


# Valoración de un Parque Eólico con Opciones Reales

26



**Prosper Lamothe<sup>1</sup>**  
Dep. de Financiación e Investigación Comercial, Universidad Autónoma de Madrid  
  
Asdfs@upc.edu  
mmendez@eserp-madrid.com



**Mariano Méndez\***  
ESERP Madrid  
  
mmendez@eserp-madrid.com

## Real Options Valuation of a Wind Farm

### INTRODUCCIÓN

El presente estudio nace del encargo realizado a los autores por un banco de inversión con sede en Londres, una de las plazas más activas del mundo en el desarrollo de proyectos de energías renovables. Se solicitaba la valoración de una cartera de proyectos de inversión en energías alternativas en países del este de Europa. Exponemos la metodología de valoración de uno de los proyectos, en el cual, los datos han sido alterados y en algunos casos no expuestos por motivo de confidencialidad.

La técnica seleccionada para la valoración es el modelo binomial de Cox, Ross y Rubinstein (1979), CRR en adelante. Como demuestra Smith (2005), los resultados de este modelo son muy similares a los reportados por el modelo de simulación de Monte Carlo. Sin embargo presenta la ventaja de que el proceso de valoración es intuitivo y transparente para los inversores, resolviendo la impresión de "caja negra" que la valoración por Monte Carlo había provocado anteriormente en algunos de los clientes del banco de inversión.

El proyecto contaba con riesgo sistemático o de mercado según el modelo del "Capital Asset Pricing Model, CAPM"<sup>2</sup>, derivado de factores como los precios de la electricidad, los tipos de cambio Euro/Moneda local, o los tipos de interés locales.

También contaba con riesgos no sistemáticos, técnicos o privados, cuyas probabilidades subjetivas de éxito/fracaso nos fueron suministradas a través de las estimaciones realizadas por los expertos de la compañía.

**CODIGOS JEL:**  
G120; G130; G240

Fecha de recepción y acuse de recibo: 2 de diciembre de 2006. Fecha inicio proceso de evaluación: 5 de diciembre de 2006. Fecha primera evaluación: 25 de enero de 2007. Fecha de aceptación: 12 de abril de 2007



### **RESUMEN DEL ARTÍCULO**

En el presente estudio valoramos el proyecto de inversión en un Parque Eólico como una Opción Real Compuesta. A través de la combinación de las distintas incertidumbres presentes hallamos la volatilidad del proyecto. Y utilizamos el modelo binomial, teniendo en cuenta los riesgos privados y de mercado del proyecto, para calcular el valor del mismo.

### **EXECUTIVE SUMMARY**

The present paper values a Wind Farm as a Compound Real Option. By combining the different uncertainties, we evaluate the volatility of the project. The value of the project is calculated using binomial lattices including Market and Private Risks.

El concepto de separación entre riesgos privados y riesgos de mercado en la valoración con Opciones Reales, originalmente introducido por Smith y Nau (1995), lo aplicamos según la técnica usada por Villiger y Bogdan (2005) para el modelo binomial.

Los cálculos de la volatilidad necesarios para replicar el proceso de difusión del valor del proyecto están basados en la hipótesis de "Market Asset Disclaimer o MAD assumption" de Copeland y Antikarov (2001), CA en adelante.

Asumimos esta hipótesis y aplicamos la técnica creada por CA (2001) y posteriormente ampliada por Brandao, Dyer y Hahn (2005) para resumir en una todas las incertidumbres de mercado del proyecto.

Existe en la literatura un estudio previo de valoración de Parques Eólicos con Opciones Reales elaborado por Venetsanos, Angelopoulou y Tsoutsos (2002). Se descarto su metodología, ya que:

En su análisis detectan dos Opciones Reales como principales: Ampliación, en nuestro caso no existe la posibilidad de ampliar el parque una vez puesto en marcha, debido a la dimensión del terreno existente para su instalación; Diferir el desarrollo, no se considera debido a que el objetivo es iniciar cuanto antes el proyecto dadas las condiciones actuales y la fase de desarrollo.

Los autores citados consideran la volatilidad del mercado eléctrico americano (75%) como aproximación para evaluar un proyecto de energía renovable en Grecia. Este nivel de volatilidad es más de diez veces la que obtuvimos en nuestro análisis y siendo conscientes del nivel de sensibilidad de las opciones a la volatilidad, consideramos que los resultados obtenidos sobrevaloran el proyecto.

Por último, su modelo, no permite incluir los riesgos privados de la fase de desarrollo del proyecto.

### JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE VALORACIÓN CON OR

En contraste con el método del VAN, los modelos basados en la metodología de Opciones Reales (OR), permiten evaluar proyectos inciertos que tienen flexibilidad gerencial, es decir, el inversor a lo largo de la vida del mismo y a través de sus decisiones, puede variar el resultado obtenido de la inversión según recibe nueva información.

Las OR no son aplicables a todos los proyectos, sino que sólo aportan valor en aquellos en los que existen posibilidades de obtener nueva información a lo largo de la vida del mismo y es posible reaccionar con nuestras decisiones a esta nueva información, como es el caso, ya que:

- El proyecto se divide en una serie de etapas independientes y sucesivas, en las que se puede decidir antes de comenzar cada fase la conveniencia de o no de continuar la inversión.
- Existe la posibilidad de abandonar el proyecto en cualquier momento antes de su lanzamiento final.

- Los riesgos privados sólo se pueden desvelar a través de la inversión en el proyecto.
- El riesgo de mercado hace variar el valor del proyecto a lo largo de su vida.

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para la instalación de un parque eólico<sup>3</sup>, necesitamos completar una serie de pasos a lo largo de un tiempo que puede durar unos 5 años. Cada hito del proyecto, implica un desembolso económico y tiene una probabilidad de éxito/fracaso.

Durante estos 5 años de desarrollo podemos abandonar la inversión en cualquier momento y no recuperaríamos ningún valor residual, o este sería mínimo. Sin embargo dada la naturaleza secuencial del proyecto evitaríamos incurrir en pérdidas mayores en el caso de que la información que vamos obteniendo no sea la que habíamos anticipado.

El proceso comienza con la localización de un terreno, la obtención de datos meteorológicos y el comienzo de las mediciones de la velocidad del viento con una torre de 30 metros.

En función de estas mediciones, que pueden durar unos dos años, podremos establecer una estimación de las velocidades del viento a alturas de entre 80 y 100 metros, que nos servirá para poder realizar una previsión de la producción de los aerogeneradores y consecuentemente tener un conocimiento más preciso de los Flujos de Caja del proyecto.

A partir de aquí se solicita la conexión a la red eléctrica, el permiso de construcción y acaba con la solicitud de permiso de operaciones, momento a partir del cual la siguiente decisión será lanzar o no el proyecto.

En el caso que se decida el lanzamiento, este comenzaría a generar flujos de caja desde su puesta en marcha hasta el fin de la vida media de los aerogeneradores, estimado en unos 20 años.

La fuente de ingresos viene dada por la venta de la electricidad producida a la compañía eléctrica. Dado que en la práctica la producción de electricidad anual de los aerogeneradores responde a una distribución normal, con poca desviación respecto a la media, e independiente de año a año, el flujo de caja generado a lo largo de la vida del proyecto suele ser relativamente estable. Si a eso añadimos las regulaciones gubernamentales de los precios de la electricidad generada por medios alternativos, podemos esperar que una vez lanzado el proyecto la volatilidad de sus flujos de caja no debe ser muy alta.

### PALABRAS CLAVE

Opciones Reales con Riesgo privado y de Mercado, Opciones Reales Compuestas, Valoración Parques Eólicos, Modelos Binomiales.

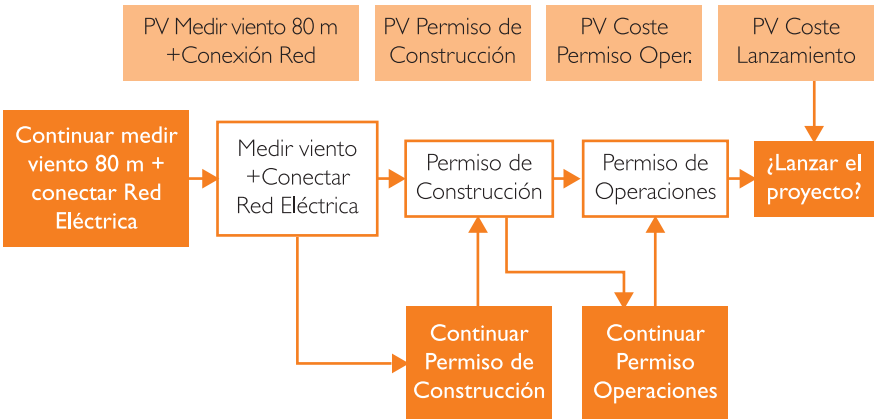
### KEY WORDS

Real Options with Market and Private Risks, Compound Real Options, Wind Farm Valuation, Binomial Lattices.

El proyecto analizado se encuentra en la fase en la que se deberán tomar las decisiones de realizar o no la medición del viento a 80 m y solicitar o no la conexión a la red eléctrica. Esquemáticamente el proceso de desarrollo del proyecto se puede observar en la figura 1.

**Figura 1**

Proceso de desarrollo del proyecto.



El esquema nos describe:

- Las decisiones/opciones en caja amarilla.
- Las posibilidades de pasar la fase con éxito en un círculo verde.
- El Valor Presente (VP) del coste de cada fase en caja azul.

Los costes de cada fase y sus probabilidades subjetivas de éxito/fracaso estimadas por los especialistas, hasta el posible lanzamiento del parque, están descritos en la tabla 1.

Para poder realizar el análisis con opciones reales, los costes de cada fase han sido actualizados al tipo libre de riesgo al momento 0, ya que estos valores serán usados para incluirlos en el modelo binomial como precio "strike" de compra del proyecto.

El valor de los flujos de caja está actualizado al Coste Medio Ponderado del Capital (CMPC) del proyecto, ya que será el valor inicial del desarrollo binomial.

Para el cálculo del CMPC, nos basamos en los tipos de interés de los bonos a 10 años del país de origen, ajustados por la prima de riesgo de crédito de la Compañía.

Para la prima de riesgo de mercado del país de origen y la Beta de la Compañía, los datos suministrados por A. Damodaran<sup>4</sup> en su página web, para primas por países y betas promedio de sectores industriales europeos y norteamericanos.

Tabla 1.

**Mill UM moneda local**

FASE	VALOR PRESENTE	TRIMESTRE RESTANTES HASTA INICIO	PROBABILIDAD DE ÉXITO	PROBABILIDAD CONDICIONADA
<b>Medición Viento y Conexión a la Red</b>	-29	0	72%	72%
<b>Permiso de Construcción</b>	-69	2	60%	43%
<b>Permiso de operación</b>	-9	4	40%	17%
<b>Lanzamiento</b>	-9,813	8		17%
<b>Coste total del Proyecto</b>	-9,920	8		17%
Todos los costes actualizados a $t$				
<b>Valor presente (VP) Flujos Caja</b>	13,673	8		17%
Actualizado a CMPC				

**TIPOS DE OPCIONES REALES EN EL PROYECTO ANALIZADO.**

Después del análisis de las flexibilidades gerenciales del proyecto hasta su lanzamiento, se concluyó que este es una OR compuesta de otras dos:

- **Opción de abandonar:** Existe la posibilidad de abandonar el proyecto en cualquier momento antes de su lanzamiento, lo que en términos financieros se conoce como una opción americana de venta. Esta opción tiene valor ya que permite evitar incurrir en pérdidas mayores en el caso de que la previsión de los estados de mercado resulten desfavorables.
- **Opción de compra secuencial:** Según vamos concluyendo etapas, tenemos la opción de decidir si queremos o no invertir en la próxima, lo que en términos financieros se denomina una opción europea de compra. La regla de decisión es la siguiente: Si invertimos 29 mill. UM en la puesta en marcha de los estudios de viento y en la conexión a la red, adquirimos el derecho-opción a invertir en la siguiente fase, pero sólo lo haremos si el valor estimado del proyecto en este momento supera los 29 mill. UM.

**CÁLCULO DE LA VOLATILIDAD DEL PROYECTO**

Para calcular los parámetros del desarrollo binomial, debemos conocer la volatilidad del proyecto. El problema es que éste no está negociado en ningún mercado y no se dispone de información histórica.

Existen varias alternativas que se utilizan frecuentemente para realizar el cálculo de la volatilidad:

- Usar la volatilidad del rendimiento de mercado de alguna empresa similar, en este caso, estaríamos haciendo una aproximación que nos podría conducir a error, debido a que sería

muy difícil encontrar una empresa con características exactas al proyecto.

- Utilizar la volatilidad de los factores que generan el flujo de caja del proyecto, como por ejemplo la volatilidad de los precios de la electricidad, pero estos factores sólo reflejan parte de la incertidumbre del proyecto.

Como alternativa más viable, elegimos aplicar la hipótesis derivada del "Market Asset Disclaimer, MAD assumption" desarrollada por CA (2001).

Esta hipótesis, ante la carencia de un método eficaz de calcular la volatilidad de proyectos únicos y sin reflejo en el mercado, sugiere utilizar el propio proyecto sin opciones como el mejor estimador del activo.

De esta forma convertimos el mercado en completo, ya que asumimos que el valor actual del proyecto es su valor de mercado y estimamos la volatilidad simulando los rendimientos esperados del mismo desde el año 0 al año 1, lo cual nos permite combinar todas las incertidumbres de mercado en una única: la volatilidad del proyecto.

Esta metodología está muy bien documentada en los capítulos 9 a 11 del libro de CA (2001) y también muy bien expresada en Brandao et al (2005), donde incluso se pueden obtener los archivos originales en Excel con los parámetros simulados en @Risk.

El método de CA (2001) sigue los siguientes pasos:

- 1) Construimos la hoja de cálculo que nos permite averiguar el valor presente del proyecto en el momento 0 ( $VP_0$ ). Descontamos estos valores al CMPC del proyecto.
- 2) Modelizamos las incertidumbres del proyecto.
- 3) Usamos un programa de simulación de Montecarlo tipo @Risk para generar la distribución de los valores presentes (VP) en el momento 0 y en el momento 1. Añadiendo a los del momento 1 los flujos de caja ( $FC_1$ ) esperados en ese período. Por lo que la volatilidad que usaremos en el proyecto viene dada por la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{1}{n} \left( \frac{VP_1 + FC_1}{VP_0} \right)$$

Este valor Z se calcula manteniendo constante el valor presente en 0 ( $VP_0$ ) para el proyecto e iterando las variables del modelo, para que hagan variar el valor presente en el momento 1:

$$VP_1 = \sum_{t=2}^n \frac{FC_t}{(1 + CNMPC)^{t-1}}$$

De la distribución del rendimiento del período 0 al 1, calculamos la desviación típica y utilizamos esta volatilidad como la volatilidad del proyecto.

Ya que asumimos que el valor del proyecto (VP) sigue una distribución lognormal con volatilidad constante, aplicamos el mismo valor de volatilidad a lo largo de su vida.

## MODELIZACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DEL PROYECTO

Una vez creada la hoja de cálculo para estimar los Flujos de Caja generados por el parque se introducen las siguientes incertidumbres:

### INCERTIDUMBRE EN COSTES

Debido a que la fecha prevista de lanzamiento será dentro de 2 años y que el 83% del coste total del proyecto se pagará a través de un préstamo en Euros concedido por un banco local, identificamos dos fuentes importantes de riesgo.

Riesgo de tipo de cambio Moneda Local / Euro: Modelizado a partir de un movimiento geométrico browniano<sup>6</sup> con tasa de crecimiento 0:

$$C_{t+1} = C_1 e^{\sigma \varepsilon \sqrt{\Delta t}}$$

Donde  $C_t$  representa el tipo de cambio,  $\sigma$  la desviación típica del rendimiento del tipo de cambio durante el último año,  $\Delta t$  el intervalo de tiempo, en nuestro caso 1 año y  $\varepsilon$  es una realización aleatoria de una distribución Normal con media 0 y desviación típica 1.

Riesgo de tipo de interés local: Modelizado a través de una distribución triangular en la que usamos como valor más probable el actual y éste menos un 1% para el valor mínimo y más un 1% para el valor máximo.

### INCERTIDUMBRE EN INGRESOS

La incertidumbre en los ingresos se modeliza a partir de 2 variables:

Por un lado la producción bruta anual, para la que se usa una distribución Normal independiente cada año. Esta distribución se basa en los estudios realizados sobre las características del viento en el terreno candidato a localizar el parque eólico.

Y por otro el precio de la electricidad, que está regulado, por lo que consideramos que fluctuará sólo por la inflación que modelizamos como una distribución triangular con valor más probable el actual y éste menos un 1% para el valor mínimo y más un 1% para el valor máximo.

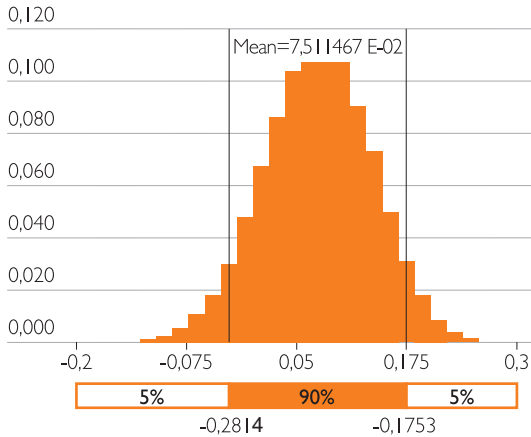
## SIMULACIÓN DE MONTECARLO Y CÁLCULO DE LA VOLATILIDAD

Una vez analizadas todas las incertidumbres del proyecto e introducidas en el modelo de descuento de flujos de caja, procedemos a aplicar la fórmula descrita anteriormente. Como resultado de este análisis obtenemos una volatilidad media para 50.000 simulaciones de  $\sigma$



**Figura 2**

Distribución del rendimiento esperado.



= 6.2%. La distribución de los rendimientos la podemos observar en la figura 2.

**MÉTODO BINOMIAL DE VALORACIÓN DE OPCIONES COMPUESTAS CON RIESGO PRIVADO**

El método binomial desarrollado por CRR (1979) se basa en la valoración según la teoría de no arbitraje y a partir de esta, en la obtención de una serie de parámetros de evolución del valor del activo y sus correspondientes probabilidades neutrales al riesgo.

34

Pasamos a describir los parámetros necesarios para su aplicación y daremos una breve intuición de lo que representa cada uno de ellos<sup>8</sup>.

El modelo parte de la idea de que a lo largo del tiempo el valor de un activo puede evolucionar con un aumento de valor o una disminución. Demuestra que en un entorno de no arbitraje esta variación de valor es independiente del rendimiento del activo, lo cual implica que el activo está libre de riesgo y como tal se habrá de actualizar a la tasa libre de riesgo. La intuición es que el riesgo de mercado está implícito en la volatilidad del activo y su factor de subida y bajada depende única y exclusivamente de esta. Por lo tanto el valor de éste, es independiente de las expectativas alcistas o bajistas que tenga el mercado sobre la evolución de su rendimiento.

Los parámetros de aumento y bajada en el valor del activo se denominan  $u$  y  $d$ , siendo su formulación:

$$u = e^{(\sigma\sqrt{\Delta t})}; d = \frac{1}{u}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación típica anual de los rendimientos del activo y  $\Delta t$  la variación de tiempo que ocurre de un periodo al siguiente que nos sirve para ajustar la volatilidad anual al periodo que estamos utilizando.

Las probabilidades neutrales al riesgo de que exista una subida  $u$  o una bajada  $d$  en el valor,

vienen representadas por  $p$  y por  $q$ :

$$p = \frac{1+r_f-d}{u-d}; q = 1-p$$

Donde  $r_f$  es la rentabilidad del activo libre de riesgo.

Las probabilidades neutrales al riesgo se multiplican por el valor futuro del activo, de forma que cuando ponderamos los valores de subida y bajada por su probabilidad y los actualizamos a la tasa libre de riesgo, este valor descontado es igual al del activo en el momento inicial.

Por ejemplo, si el valor del activo es 100 actualmente, su valor de subida es 120 y su valor de bajada es 90 y tenemos una tasa libre de riesgo del 10%, las probabilidades neutrales al riesgo son aquellas que igualan:

$$V_0 = \frac{V_u p + V_d (1-p)}{(1+r_f)}$$

Por lo tanto:

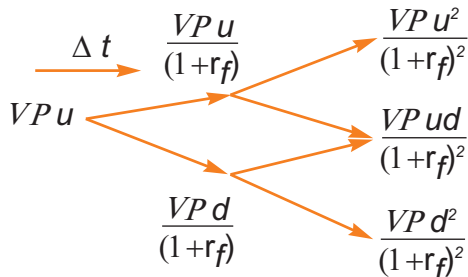
$$100 = \frac{120p+90(1-p)}{(1,1)}; p = 0,69$$

Una vez descritos los parámetros, los datos necesarios para la valoración son:

- El valor actual de los flujos de caja esperados del proyecto ( $VP$ ).
- La volatilidad esperada del rendimiento del proyecto ( $\sigma$ ).
- El tipo de interés libre de riesgo ( $r_f$ ).
- Coste de la inversión para el lanzamiento del proyecto ( $I$ ).
- Probabilidades estimadas de éxito en cada fase de decisión ( $s$ ).
- Coste de las inversiones intermedias ( $C$ ).

El proceso se desarrolla en tres fases:

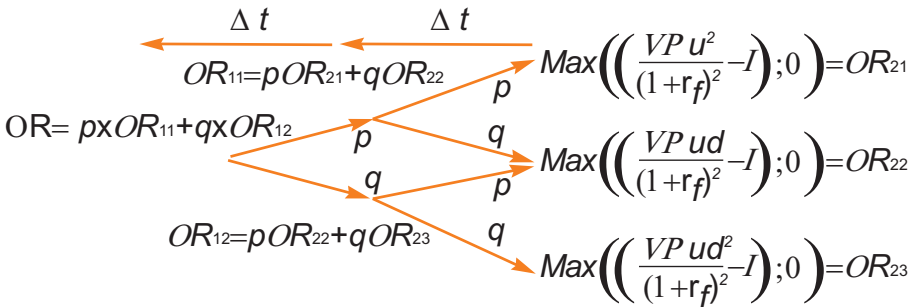
- 1) Creamos el proceso de difusión del valor del activo basándonos en los movimientos de subida  $u$  y de bajada  $d$  del valor presente del proyecto ( $VP$ ) y lo actualizamos a la tasa libre de riesgo  $r_f$ .



## VALORACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO CON OPCIONES REALES

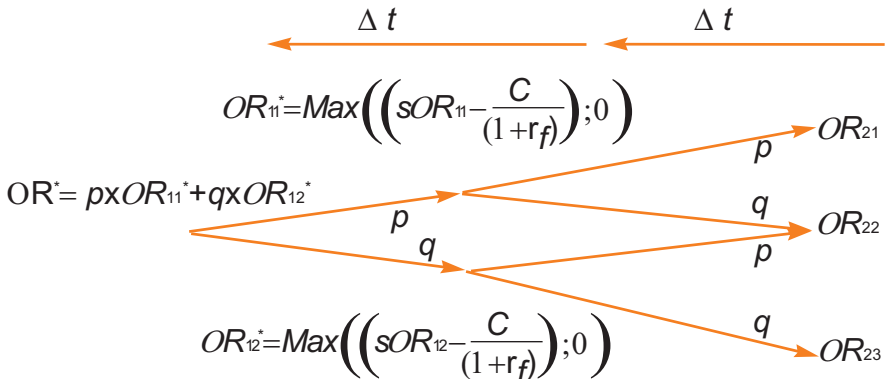
- 2) Comparamos el valor anterior con el valor de la inversión para el lanzamiento del proyecto  $I$  actualizado al momento presente, eligiendo el máximo entre el valor obtenido y 0 para obtener el valor de la opción OR en ese nodo.

Ajustamos recursivamente desde el momento final al inicial por las probabilidades neutrales al riesgo de subida y bajada. Es decir, hallamos la esperanza de que esos valores ocurran.



36

- 3) Añadimos el riesgo privado, es decir, las probabilidades de éxito s estimadas por la compañía para poder completar la fase 1 del proyecto. Así como el coste esperado  $C$  para poder acometer esta fase actualizándolo a la tasa libre de riesgo  $r_f$ . Y volvemos a usar la regla de optimización entre el valor del proyecto y 0, eligiendo sólo valores mayores que 0. De forma que obtenemos el valor final de la opción,  $OR^*$ .



### REGLA DE MAXIMIZACIÓN

La regla de maximización teniendo en cuenta el riesgo privado, corresponde por tanto a la siguiente fórmula:

$$\text{Max}\{[(OR \cdot p + OR \cdot q) \cdot \text{Probabilidad-VP coste de la fase}]; 0\}$$

- Invertiremos sólo si el valor esperado del proyecto, ajustado por la probabilidad de llegar a ese estado, es mayor que el valor de la inversión. Es decir, compraremos la siguiente fase del proyecto, únicamente, si el valor de esta fase multiplicado por su probabilidad es mayor que el desembolso que tenemos que realizar.
- En caso contrario, abandonaremos el proyecto y su valor pasará a ser 0 en ese punto.

### CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS BINOMIALES

Calculamos los parámetros de la binomial, en base a la siguiente información del proyecto.  $\Delta\text{T tiempo} = 0.25$  (3 meses);  $\sigma = 6.16\%$ ;  $r_{\text{anual}} = 6.2\%$ ;  $r_{\text{trimestral}} = 1.74\%$   
Obteniendo los valores de la tabla 2:

$u = e^{0.062 \cdot 0.25} = 1.03$	$d = \frac{1}{1.03} \cdot 0.97$
$p = \frac{(1 + 0.0174) - 0.97}{1.03 - 0.97}$	$q = 1 - 0.7747 = 22.53\%$

### APLICACIÓN DEL MODELO BINOMIAL AL PROYECTO

Creamos el proceso de difusión binomial partiendo del valor presente de los flujos de caja del proyecto y lo actualizamos al tipo libre de riesgo trimestral. Y lo podemos observar en la tabla 3.

Tabla 3.

Trimestre	0	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>PV binomial</b>	13,673	13,862	14,054	14,249	14,446	14,646	14,849	15,054	15,263
		13,029	13,209	13,392	13,578	13,766	13,956	14,149	14,345
			12,415	12,587	12,761	12,938	13,117	13,299	13,483
				11,830	11,994	12,160	12,329	12,499	12,672
					11,273	11,429	11,587	11,748	11,910
						10,742	10,891	11,042	11,194
							10,236	10,378	10,521
								9,754	9,889
									9,294

MillUM

38

Incluimos las opciones existentes a lo largo de la vida del proyecto.

Aplicando las reglas de maximización resolvemos el desarrollo. Obteniendo de esta forma el valor de la opción de invertir en el proyecto que se sitúa en 584 millones de um de moneda local.

Como podemos observar en la tabla 4, es óptimo lanzar el proyecto en todos los posibles estados del mercado, excepto en uno. Este hecho nos indica que el proyecto en la mayoría de los casos nos dará un VAN positivo.

### COMPARACIÓN OPCIONES REALES VAN

Para comparar la valoración obtenida con el método de OR respecto al VAN, mostramos en la tabla 5 los Valores obtenidos por las dos metodologías.

Como podemos observar, el VAN infravalora el proyecto en 25 millones de um. Ya que no tiene en cuenta la flexibilidad gerencial del proyecto a lo largo de su desarrollo. El VAN considera que una vez puesto en marcha el proceso de inversión es irreversible y en ningún caso habrá estados del mercado desfavorables, o más favorables de lo previsto para la continuación del proyecto.

### CONCLUSIONES

El mayor riesgo del proyecto viene dado por las fases de desarrollo del mismo ya que la probabilidad condicionada de haber superado todas las fases hasta llegar al lanzamiento es de un 17%.

Dadas las características de este tipo de inversiones, cabía esperar un bajo nivel de volatilidad en sus rendimientos. Este nivel de incertidumbre se captura de una forma

Tabla 4.

Estado del Mercado	13,673	14,103	14,547	15,006	15,478	15,965	16,468	16,986	17,521
Valor de la Opción	584	898	944	1,765	1,844	4,833	5,036	5,241	5,450
Decisión	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
Millones UM		13,256	13,673	14,103	14,547	15,006	15,478	15,965	16,468
		698	741	1,422	1,496	3,953	4,143	4,336	4,532
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		12,851	13,256	13,673	14,103	14,547	15,006	15,478	15,965
		550	1,100	1,170	3,125	3,304	3,486	3,670	3,854
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		12,851	12,851	12,851	12,851	12,851	12,851	12,851	12,851
		550	863	863	863	863	863	863	863
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		12,459	12,459	12,459	12,459	12,459	12,459	12,459	12,459
		798	798	798	798	798	798	798	798
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		12,078	12,078	12,078	12,078	12,078	12,078	12,078	12,078
		575	575	575	575	575	575	575	575
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		11,710	11,710	11,710	11,710	11,710	11,710	11,710	11,710
		935	935	935	935	935	935	935	935
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		11,352	11,352	11,352	11,352	11,352	11,352	11,352	11,352
		450	450	450	450	450	450	450	450
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		11,006	11,006	11,006	11,006	11,006	11,006	11,006	11,006
		59	59	59	59	59	59	59	59
		Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar	Continuar
		10,670	10,670	10,670	10,670	10,670	10,670	10,670	10,670
		0	0	0	0	0	0	0	0
		Abandonar	Abandonar	Abandonar	Abandonar	Abandonar	Abandonar	Abandonar	Abandonar
<b>Trimestre</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Probabilidad de éxito	72%		60%		40%				
Inversión	-29		-69		-9				-9,813
Fase	Medición viento 80m		Permiso de Constr.		Permiso Op.				Lanzamiento
	Conexión a la red								

muy eficaz mediante la metodología propuesta por CA (2001), ya que consigue resumir todos y cada uno de los riesgos de mercado estimados en el proyecto en una volatilidad del 6.2%, valor que coincide con el entorno de valores esperados por la experiencia de los especialistas del proyecto en la puesta en marcha de este tipo de inversiones.

Por lo tanto, consideramos que en este caso no habría sido adecuado el usar volatilidades estimadas en función de los rendimientos de acciones cotizadas de empresas

Tabla 5.

FASE	VP MOMENTO 0	PROBABILIDAD	VP AJUSTADO
<b>III Medición de Viento a 80 m y</b>			
<b>Conexión a la Red Eléctrica</b>	-29	100%	-29
<b>IV Permiso de Construcción</b>	-69	100%	-69
<b>V Permiso de Operación</b>	-9	100%	-9
<b>Lanzamiento</b>	-9.813	17%	-1696
<b>Coste Total del Proyecto</b>			-1803
<b>VP Flujos de Caja</b>	13.673	17%	2363
<b>VAN ajustado por la Probabilidad</b>			<b>560</b>
<b>Valor de la Opción de Invertir</b>			<b>584</b>
<b>Valor de la Opcionalidad</b>			<b>25</b>

similares. Ya que como el valor de la opción es una función directa y creciente con el nivel de volatilidad habríamos sobrevalorado el valor del proyecto.

Por ejemplo, una volatilidad del 34% (volatilidad usual en los rendimientos de las acciones) nos situaría el valor de la opción en 730 millones um. En este caso, habríamos sobrevalorado el valor del proyecto en 146 millones de um.

Esta diferencia nos podría haber conducido al error de haber invertido en un proyecto mucho menos rentable de lo estimado, si éste no hubiera tenido un VAN tan positivo, (dentro de dinero en la terminología de opciones).

Por lo que, independientemente del método de OR usado, recomendamos centrar el análisis en la modelización y captura de las incertidumbres del proyecto, ya que estas son sus principales fuentes de valor.

## REFERENCIAS

- Brandao, Luiz E., James S. Dyer, Warren J. Hahn. 2005. Using binomial trees to solve real-option valuation problems. *Decision Analysis*. 2(2) 69-88
- Copeland, T., Antikarov, V. 2001. *Real Options*. Texere LLC, New York.
- Cox, J., S. Ross, M. Rubinstein. 1979. Option pricing: a simplified approach. *J. Financial Economy*. 7 229-263.
- Grinblatt, M., Titman, S. 2002. *Financial Markets and Corporate Strategy*, Second Edition, McGraw-Hill.

- Hull, J., 2003. Options, Futures, and Other Derivatives, 5th. ed. Prentice Hall. New York.
- Mascareñas J., Lamothe P., Lopez F. y Luna W. 2004. Opciones Reales y Valoración de Activos. Prentice Hall. Madrid.
- Neftci, S. 1996. An introduction to the mathematics of financial derivatives. harcourt-international.com
- Villiger, R., Bogdan, B. 2005. Getting real about valuations in biotech. Nature Biotechnology. 23 (4). 423 - 42
- Smith, James E., 2005. Alternative Approaches for Solving Real-Options Problems (Comment on Brandão et. al. 2005). Decision Analysis 2 (2), 89-102.
- Smith, James E., Nau, Robert F. 1995. Valuing risky projects: option pricing theory and decision analysis. Management Science. 41 (5) 795-816
- Venetsanos, K., Angelopoulou, A., Tsoutsos, T., 2002. Renewable energy sources project appraisal under uncertainty: the case of wind energy exploitation within a changing energy market environment. Energy Policy 30 293-307

## Notas

1. Autor de Contacto: Departamento de Financiación e Investigación Comercial; Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales; Universidad Autónoma de Madrid; Campus de Cantoblanco; C/Francisco Tomás y Valiente, 5; 28049 Madrid (España).

\* Queremos agradecer los valiosos comentarios del Profesor Juan Mascareñas y de un evaluador anónimo.

2. Sobre el CAPM y la descomposición del riesgo en sistemático y específico puede consultarse Grinblatt y Titman (2002)

3. Para obtener información detallada en castellano de cada una de las fases de desarrollo de un proyecto eólico, recomendamos la página web de la Asociación Danesa de la Industria del Viento. <http://www.windpower.org/composite-188.htm>.

4. <http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>

5. La fórmula en tiempo discreto de un movimiento geométrico browniano corresponde al siguiente desarrollo:

$$C_{t+1} = C_t e^{((\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)\Delta t + \sigma\varepsilon\sqrt{\Delta t})}$$

en nuestro caso suponemos que la deriva, "drift"  $(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)$  es 0.

6. Al lector interesado en el modelo le recomendamos como introducción Mascareñas, Lamothe, Lopez y Luna (2004), los capítulos 10 y 12 de Hull (2003) para un desarrollo más avanzado y para una mayor profundidad matemática el capítulo 2 de Neftci (1996).