

---

LAS OPCIONES REALES COMO  
METODOLOGÍA DE VALORACIÓN DE UN  
PROYECTO EN EL SECTOR DE ENERGÍA

The real options as a valuation  
methodology for a project  
in the electrical sector

As opções reais como  
metodologia de avaliação de  
um projeto no setor elétrico

Armando Lenin Támara Ayús, Julián Forero Corrales,  
Isabella Gil Osorio, Paula María Almonacid Hurtado

---

## LAS OPCIONES REALES COMO METODOLOGÍA DE VALORACIÓN DE UN PROYECTO EN EL SECTOR DE ENERGÍA

The real options as a valuation methodology for a project in the electrical sector

As opções reais como metodologia de avaliação de um projeto no setor elétrico

Armando Lenin Támara Ayús<sup>a</sup>, Julián Forero Corrales<sup>b</sup>,  
Isabella Gil Osorio<sup>c</sup>, Paula María Almonacid Hurtado<sup>d</sup>

**Keywords:** Real options, Expansion option, Binomial trees, Energy sector.

**Palabras clave:** Opciones reales, Opción de expansión, Árboles binomiales, Sector energía.

**Palavras-chave:** Opções reais, Opção de expansão, Árvores binomiais, Setor de energia.

**Clasificación IEL:** G17, G12, G19.

**Received:** 11/01/2019

**Accepted:** 01/10/2019

**Published:** 19/12/2019

a. Ph. D. en Administración y Msc. en Finanzas de la Universidad EAFIT  
atamaraa@eafit.edu.co  
Orcid: 0000-0003-3619-5164

b. Profesional en Finanzas de la Universidad EAFIT  
Jforero4@eafit.edu.co  
Orcid: 0000-0003-1352-2791

c. Profesional en Finanzas de la Universidad EAFIT  
igil@eafit.edu.co  
Orcid: 0000-0001-5600-3225

d. Ph. D. (C) en Ciencias Estadística de la Universidad Nacional de Colombia  
palmona1@eafit.edu.co  
Orcid: 0000-0001-7639-8631

### Resumen

El presente trabajo pretende aplicar la teoría de opciones reales en un proyecto de construcción de una pequeña central hidroeléctrica en Colombia. El cálculo del valor presente neto y de la tasa interna de retorno indica que el proyecto es viable; sin embargo, estas metodologías desconocen la opción de expansión existente en dicho proyecto. El artículo presenta el cálculo de esta opción basándose en la metodología de árboles binomiales, en los que la volatilidad se obtiene a través de un modelo EGARCH elaborado con base en los retornos diarios de los precios de la energía. Se concluye que la opción real hace viable el proyecto, a la vez que desarrolla herramientas que ayudan a trabajar este tipo de casos en las valoraciones de proyectos pertenecientes al sector energía.

### Abstract

This paper intends to apply the theory of real options in a construction project for a small hydroelectric power station in Colombia. The calculation of the net present value and the internal rate of return indicate that the project is viable, however, these methodologies are unaware of the option of expansion existing in said project. The article presents the calculation of this option based on the binomial tree methodology, where volatility is obtained through an EGARCH model based on the daily returns of energy prices. It is concluded that the real option makes the project viable, while developing tools that help to work this type of case in the valuations of projects belonging to the energy sector.

## Resumo

Este artigo pretende aplicar a teoria das opções reais em um projeto de construção de uma pequena central hidrelétrica na Colômbia. O cálculo do valor presente líquido e da taxa interna de retorno indicam que o projeto é viável, no entanto, essas metodologias desconhecem a opção de expansão existente no referido projeto. O artigo apresenta o cálculo dessa opção com base na metodologia da árvore binomial, onde a volatilidade é obtida por meio de um modelo EGARCH baseado no retorno diário dos preços da energia. Conclui-se que a opção real viabiliza o projeto, desenvolvendo ferramentas que ajudam a trabalhar esse tipo de caso nas avaliações de projetos pertencentes ao setor energético.

## 1. Introducción

La metodología de valoración de proyectos de inversión a partir de opciones reales ha venido tomando fuerza en los últimos años, en especial para proyectos relacionados con la industria eléctrica, debido a que la naturaleza misma de este tipo de proyectos los hace particularmente sensibles a cambios relacionados con los aspectos regulatorios del mercado, precios de los combustibles, el medio ambiente, la demanda y la oferta de energía, entre otros. A diferencia de las metodologías tradicionales como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), las opciones reales logran capturar el efecto que estos aspectos tienen sobre el valor de los proyectos, creando así un modelo de valoración mucho más robusto y eficaz frente a las otras metodologías ya mencionadas.

Este trabajo explora la posibilidad de construir una pequeña central hidroeléctrica (PCH) que en su etapa inicial estaría conformada por dos turbinas, con la posibilidad de incluir una tercera. El escenario posterior a la construcción de la PCH arroja una opción de expansión, la cual debe ser tratada bajo la teoría de opciones reales; por lo tanto, una segunda instancia de este trabajo fue realizar una revisión de las metodologías tradicionales relacionadas con la valoración de proyectos. Paso seguido, se presenta una explicación teórica sobre las opciones reales y su estrecha relación con las opciones financieras. Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica de los estudios relacionados con la valoración de proyectos en el sector de energía a partir de las opciones reales; se continuó con el análisis de un proyecto con existencia de una opción real y se procedió a revisar los resultados obtenidos a la luz de la valoración, para, así, finalizar con unas conclusiones.

## 2. Técnicas de valuación de proyectos

Tradicionalmente, para valuar la viabilidad financiera de un proyecto se utiliza diferentes técnicas que miden los retornos que se derivan de una inversión inicial, que posteriormente genera flujos de caja. En torno a la valuación de proyectos, las técnicas más utilizadas han sido el VPN, la TIR y el periodo de recuperación (PR), entre otros. Sin embargo, dichas técnicas poseen algunas limitaciones, tal y como lo plantea [Gónima \(2016\)](#):

- La mayoría de modelos son estáticos, ya que solo consideran un rango predeterminado para evaluar los flujos de caja del proyecto, dejando de lado la posibilidad de valuar su ejecución en otro momento y bajo otras circunstancias.
- No se considera la flexibilidad, suponiendo que los inversionistas no realizarán modificaciones al proyecto durante la ejecución, despreciando así cambios en el entorno.

- No cuentan con la opción de posponer la inversión: “la inversión es, desde el inicio, irreversible e impostergable”.

[Santos, Soares, Mendes y Ferreira \(2013\)](#) indican que la diferenciación más evidente entre la valoración con opciones reales y los métodos de valoración tradicionales es la importancia que se le brinda a la flexibilidad; esta es una de las características más importantes de este tipo de proyectos, pues toma en cuenta opciones de gestión, tales como contracción, expansión, abandono del proyecto, entre otras.

### 3. Teoría de las opciones reales

En el sector de energía, recientemente se ha empleado como herramienta la teoría de las opciones reales. [Mendoza y Gutiérrez \(2016\)](#) señalan que esta teoría valora aspectos de control de gestión, basándose principalmente en la teoría de las opciones financieras y la estrategia empresarial. Por lo tanto, constituye una de las bases más importantes de la teoría financiera moderna.

Al respecto, [Agaton y Karl \(2018\)](#) indican que las opciones reales son entendidas propiamente como “el derecho, más no la obligación, de tomar una acción (posponer, expandir, contraer o abandonar) a un costo determinado (denominado precio de ejercicio), por un periodo de tiempo determinado (periodo de validez de la opción) (p. 57). En el mismo trabajo, [Agaton y Karl \(2018\)](#) anotan que estas decisiones de inversión tienen unas características principales, y que son irreversibles, además, inciertas, por lo que suponen un alto riesgo y pueden ser flexibles. Estas características no son capturadas por los métodos tradicionales de valoración, como lo son el VPN, el flujo de caja descontado (FCD), la TIR, el retorno sobre la inversión (ROI) y demás, lo que conlleva así malas decisiones de inversión.

[Arango y Botero \(2017\)](#) señalan que al aplicar las opciones reales en la valoración de un proyecto se están complementando los resultados obtenidos con los métodos de valoración tradicionales, ya que, estos últimos, menosprecian los valores que pueden tomar los proyectos cuando presentan en alguna medida flexibilidad e incertidumbre. Adicionalmente, estos factores pueden ser entendidos como cambios en el entorno y en las condiciones del mercado, lo cual finalmente influenciaría las acciones y decisiones de los administradores o encargados del proyecto. [Bonis, Palenzuela y Herrero \(2009\)](#) recalcan la utilidad de la simulación Montecarlo en la valoración de proyectos que contengan o posean algún tipo de opciones reales; pues la simulación aporta la posibilidad de estimar el VPN ampliado de todos aquellos proyectos cuyos flujos de tesorería dependan del valor de una o más variables de estado, indiferente de cualquiera que sea su patrón de comportamiento estocástico. [Bonis, Palenzuela y Herrero \(2007\)](#) enfatizan en que el proceso geométrico-browniano resulta muy útil para interpretar el comportamiento de los precios de los activos financieros, pero no es óptimo para otras variables de naturaleza no financiera; al no presentar esta limitación en su aplicación, la simulación Montecarlo es considerada una herramienta más adecuada para la valoración de opciones reales.

Finalmente, [Bonis et al. \(2007\)](#) establecen que la simulación Montecarlo trabaja bajo el supuesto de la consecución de muestras aleatorias del comportamiento dinámico de las fuentes de incertidumbre, de las cuales depende el valor del derivado. La estimación de una única trayectoria de la evolución de cada variable no es suficiente para aproximar el valor de la opción; por lo general, al aumentar el número de trayectorias se mejora la precisión en la estimación del resultado.

#### 4. Opciones reales en el sector

Muchos autores se han encontrado interesados en la valoración de proyectos del sector de energía, de tal suerte que la literatura en cuanto a los estudios realizados en este sector es extensa. Dichos estudios demuestran que la aplicación de las opciones reales en el sector de energía consideran principalmente la opción de diferir o retrasar la inversión, como se evidencia en los estudios realizados por [Agaton y Karl \(2018\)](#); [Scarcioffolo, Perobelli y Chimeli \(2018\)](#); [Acevedo, Jiménez y Agudelo \(2018\)](#); [Cartea y Jaimungal \(2017\)](#); [Henao, Sauma, Reyes y Gonzalez \(2017\)](#); [Fleten, Haugom y Ullrich \(2017\)](#); [Zhang, Zhou y Zhou \(2016\)](#); [Cuervo \(2015\)](#) y [Fertig, Heggedal, Doorman y Apt \(2014\)](#).

Es de esperar que no todos los estudios lleguen a la misma conclusión, lo anterior se basa en el argumento de que cada trabajo toma en cuenta diferentes supuestos. [Agaton y Karl \(2018\)](#) demostraron en su estudio que al retrasar o postergar la inversión de un proyecto de energía renovable se puede incurrir en pérdidas, considerando la incertidumbre relacionada con el diésel y la energía. Por otra parte, [Acevedo et al. \(2018\)](#) descubrieron la viabilidad de un proyecto de energía renovable a partir del segundo año, donde, al aplicar una opción de aplazamiento, se les brinda más flexibilidad a los futuros inversionistas. En su estudio se demuestra cómo la aplicación de las opciones reales permite no descartar la inversión en el proyecto en primera instancia, cuando se observan los resultados negativos de los indicadores arrojados por los métodos tradicionales de valoración. Esto gracias a la evaluación financiera ajustada a las decisiones futuras, derivada de la aplicación de las opciones reales. Otro estudio es el de [Fertig et al. \(2014\)](#), quienes analizaron los planes de expansión de complejos de almacenamiento de energía aplicando la opción real de posponer la construcción del complejo en cuestión. Después de valorar la viabilidad del proyecto, basada en los precios futuros de la energía, se llegó a la conclusión de que se debería mantener la opción por lo menos ocho años, periodo en el cual se podría obtener más información, lo que finalmente beneficiaría la estrategia del proyecto.

En términos generales, los estudios de valoración de proyectos en el sector de energía utilizan como métodos de solución la simulación Montecarlo y los árboles binomiales, tal es el caso de los trabajos presentados por [Mendoza y Gutiérrez \(2016\)](#); [Fleten, Linnerud, Molnár y Tandberg \(2016\)](#); [Ahumada y Andalaft \(2013\)](#); [Jain, Roelofs y Oosterlee \(2013\)](#); [Maya, Hernández y Gallego \(2012\)](#); [Cartea y González \(2012\)](#); [Westner y Madlener \(2012\)](#); [Min, Lou y Wang \(2012\)](#); [Rohlf s y Madlener \(2011\)](#); [Nishimura \(2011\)](#); [Concha, Andalaft y Farías \(2009\)](#); [Otero, Andalaft y Vásquez \(2008\)](#) y [Bonis et al. \(2009\)](#). Estos autores concluyen que, al valorar proyectos de esta índole, con el enfoque de las opciones reales y con los métodos mencionados, el valor obtenido generalmente es mayor en comparación con los métodos de valoración tradicionales que no valoran la flexibilidad.

Es importante mencionar que los precios de la energía son considerados como la fuente de incertidumbre principal en la mayoría de los estudios de valoración de proyectos en este sector, pero también se consideran otros factores. Los estudios realizados por [Chen, Zhang, Wang, Zhu y Li \(2018\)](#); [Björgum \(2016\)](#) y [Scarcioffolo et al. \(2018\)](#) consideran como determinantes de gran importancia las fuentes de incertidumbre relacionadas con factores gubernamentales; así como también las mejoras tecnológicas y el mercado. Por su parte, [Ming, Ping, Shunkun y Ge \(2016\)](#) analizaron el impacto de la incertidumbre y la fluctuación del precio del combustible sobre la inversión.

Finalmente, como se indicó al inicio de esta sección, la literatura de valoración de proyectos del sector de energía utilizando opciones reales es extensa, por lo que los casos no presentan una región geográfica específica. Sin embargo, se presentan numerosos estudios de casos en el continente asiático,

como los de [Agaton y Karl \(2018\)](#), [Acevedo et al. \(2018\)](#), [Chen et al. \(2018\)](#), [Ming et al. \(2016\)](#), [Zhang et al. \(2016\)](#), en los que se evalúan proyectos en Filipinas, China, Mongolia e Indonesia. Para Norte América se cuenta con los estudios realizados por [Scarcioffolo et al. \(2018\)](#) y [Fleten et al. \(2017\)](#); para Sur América se tienen los análisis realizados por [Ahumada y Andalaft \(2013\)](#) y [Maya et al. \(2012\)](#), con casos en Chile y Colombia respectivamente, y para Europa, los estudios de [Fleten et al. \(2016\)](#), [Fertig et al. \(2014\)](#), [Gazheli y Di Corato \(2013\)](#), [Cartea y González \(2012\)](#) y [Westner y Madlener \(2012\)](#), con evaluaciones en Noruega, Alemania, Italia y Holanda.

## 5. Caso de estudio

Como caso de estudio se analiza un proyecto que consiste en construir una PCH en el departamento de Antioquia, por un valor de 56 000 millones COP como inversión inicial (este valor considera dos turbinas y las adecuaciones necesarias para dar comienzo a la operación). Se espera que el proyecto presente una vida útil de cincuenta años; sin embargo, existe la posibilidad de expandir la producción de energía durante los primeros seis años, incorporando una tercera turbina.

Inicialmente, la central hidroeléctrica generará 105 millones de kilovatios (kWh) por año, de los cuales solo se tendrá de producción el 60 % de esta capacidad, lo anterior, dados los requerimientos técnicos para proyectos de este tipo. Por otra parte, el plan de expansión del proyecto se daría debido a un aumento en los precios de energía en el mercado energético. Para poder llevar a cabo el plan de expansión sería necesaria una nueva turbina, cuyo costo es de 23 520 millones COP. Donde finalmente se presentaría una expansión del 30 % de la producción actual. Tomando como referencia el costo de la nueva turbina y el porcentaje de crecimiento en caso de expansión, se plantea la posibilidad de realizar una revisión cada año, durante los seis primeros años de actividad del proyecto para determinar la viabilidad del plan de expansión.

El objetivo de este trabajo es analizar el caso en su totalidad, por lo que, en primera instancia, se consideran los siguientes factores financieros:

- La estructura financiera del proyecto se establece en un 60 % deuda y un 40 % capital propio. La deuda se establece con un plazo de diez años a una tasa de interés del 15 % efectivo anual con amortizaciones iguales por año.
- El proyecto cuenta con los siguientes costos:
  - Operativos: 45 % de los ingresos.
  - Administración, operación y mantenimiento: 7 % de los ingresos.
  - Comisión por intermediación: 3,2 % de los ingresos.
- El proyecto debe asumir el pago de licencias, permisos ambientales, interventoría, honorarios y seguros por un total de 5000 millones COP.
- La tasa mínima requerida por los accionistas es del 25 %.
- La tasa de impuestos efectiva es del 33 %.

- Los flujos de caja cuentan con una tasa de crecimiento a perpetuidad del 3 %.
- El precio de la energía presenta una tasa de crecimiento del 3,04 %.

## 6. Valuación del proyecto por técnicas tradicionales

La primera parte de la valoración del proyecto la comprende la utilización de las técnicas tradicionales, en este caso, el VPN y la TIR. Para el cálculo del VPN, se hace necesario encontrar la tasa de descuento de los flujos de caja libre, aquí, el costo de la estructura financiera se mide a través del WACC (*Weighted Average Cost of Capital*), así:

$$WACC = \%D \cdot K_d (1 - T) + \%E \cdot K_e \quad (1)$$

Donde:

$\%D$ : participación de la deuda en la financiación del proyecto.

$\%E$ : participación del patrimonio (*Equity*) en la financiación del proyecto.

$K_d$ : costo de la deuda.

$T$ : tasa impositiva.

$K_e$ : costo del patrimonio, tomado como la tasa mínima requerida por los accionistas.

Para el cálculo del  $K_e$ , se calcula primero el  $K_u$  (costo del patrimonio bajo una estructura financiera sin deuda) con el modelo de valoración de activos financieros (CAPM, por sus siglas en inglés), tomando como referencia para los parámetros en la ecuación el mercado estadounidense, así:

La tasa libre de riesgo está representada por la tasa de los bonos del tesoro norteamericano a diez años (*Treasury*).

La rentabilidad del mercado se calcula con base en el índice S&P500 con un histórico de diez años.

Se toma el beta desapalancado de la industria de energía del mercado emergente que suministra el profesor [Damodaram \(2019\)](#).

El riesgo país es tomado de la gerencia central de estudios económicos del [Banco Central de Reserva de Perú \(2019\)](#), que se calcula con base en el indicador de bonos de mercados emergentes (EMBI, por sus siglas en inglés).

Luego, se utiliza la devaluación para pasar la tasa de dólares a pesos colombianos, para posteriormente calcular el  $K_e$  de la siguiente manera:

$$K_e = K_u + (K_u - K_d) \cdot \frac{D}{E} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos a través de este procedimiento se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Cálculo del costo de la estructura financiera del proyecto**

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tasa libre de riesgo (Treasury 10 years)	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
Rentabilidad del mercado (S&P 500)	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
Beta desapalancada (Damodaram -Energy-)	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
Riesgo país (EMBI)	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Ku (USD)	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27	18,27
Inflación EE. UU.	2,73	2,27	2,23	2,23	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Inflación Colombia	3,20	3,25	3,09	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Devaluación	0,46	0,96	0,84	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Ku (COP)	18,81	19,40	19,26	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15
% D	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
% E	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Kd	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Ke	24,52	26,00	25,65	25,39	25,36	25,36	25,36	25,36	25,36	25,36
WACC	15,84	16,43	16,29	16,19	16,18	16,18	16,18	16,18	16,18	16,18

Valores en porcentajes a excepción del beta desapalancado.

Fuente: elaboración propia.



Luego de encontrar el *WACC* para cada periodo, se procede a calcular el VPN y la TIR del proyecto. A continuación, se presenta en la Tabla 2 los resultados obtenidos del cálculo del VPN y de la TIR.

**Tabla 2.** Valoración por flujo de caja descontado

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Utilidad operativa		5 815	6 135	6 455	6 805	7 156	7 517	7 889	8 272	8 667	9 074
Depreciación		4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704
Inversiones	61 000										
FC operativo	-61 000	10 519	10 839	11 169	11 509	11 860	12 221	12 593	12 976	13 371	13 778
Impuestos operativos	0	1 919	2 024	2 133	2 245	2 361	2 480	2 603	2 730	2 860	2 994
FC libre	-61 000	8 600	8 815	9 036	9 263	9 498	9 740	9 989	10 246	10 511	10 784
Valor terminal											74 588
FCL VT	-61 000	8 600	8 815	9 036	9 263	9 498	9 740	9 989	10 246	10 511	85 372
Factor de descuento		0,86	0,74	0,63	0,54	0,47	0,40	0,35	0,30	0,25	0,22
VP FC libre con VT	61 618	7 424	6 536	5 761	5 083	4 486	3 960	3 496	3 086	2 725	19 056
VPN	618 076										
TIR	16,3 %										

Valores en millones COP.

Fuente: elaboración propia.

Los métodos tradicionales de valoración dan en primera instancia un VPN de 618 076 088 COP, y, aunque el VPN sea mayor que cero, el valor se encuentra bajo en consideración al monto invertido y al tiempo de espera de recuperación. Respecto a la TIR, esta fue del 16,37 %, muy cercana al *WACC* promedio, con lo cual tampoco se hace llamativo el proyecto por lo mencionado en el VPN. Por otra parte, como desarrollo de la investigación, se realizó el cálculo de estos dos indicadores utilizando metodologías de simulación financiera, que permiten sensibilizar el valor del proyecto bajo los escenarios pesimistas y optimistas. Para la simulación se utilizó el aplicativo @Risk Simulator, aplicando 10 000 simulaciones con base en las variables de entrada: precio de la energía, capacidad anual promedio y tasa de crecimiento del precio de la energía, todas estas se trabajaron con una distribución triangular. La Tabla 3 muestra los diferentes escenarios establecidos para la simulación.

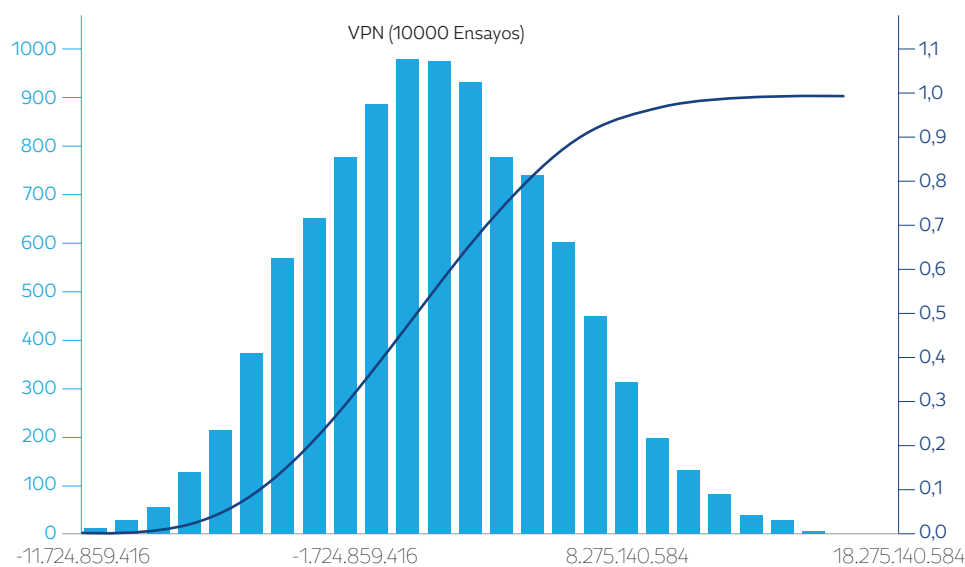
**Tabla 3. Escenarios de las variables de entrada para la simulación**

Variable	Escenarios		
	Pesimista	Moderado	Optimista
Precio energía kWh (en COP)	341	361	381
Capacidad anual promedio	50 %	60 %	70 %
Tasa de crecimiento del precio de energía	1%	3%	5%

Fuente: elaboración propia.

Los resultados arrojados muestran que el VPN posee un valor medio de 612 382 802 COP, donde bajo un escenario optimista podría tener un valor de 16 215 394 134 COP, y bajo un escenario negativo el valor sería de -12 470 697 806 COP. Los valores antes encontrados son producto de una alta desviación estándar, debido a los movimientos que pueden tener las tres variables de entrada que posee el proyecto y su influencia sobre este.

**Figura 1. Simulación del VPN**

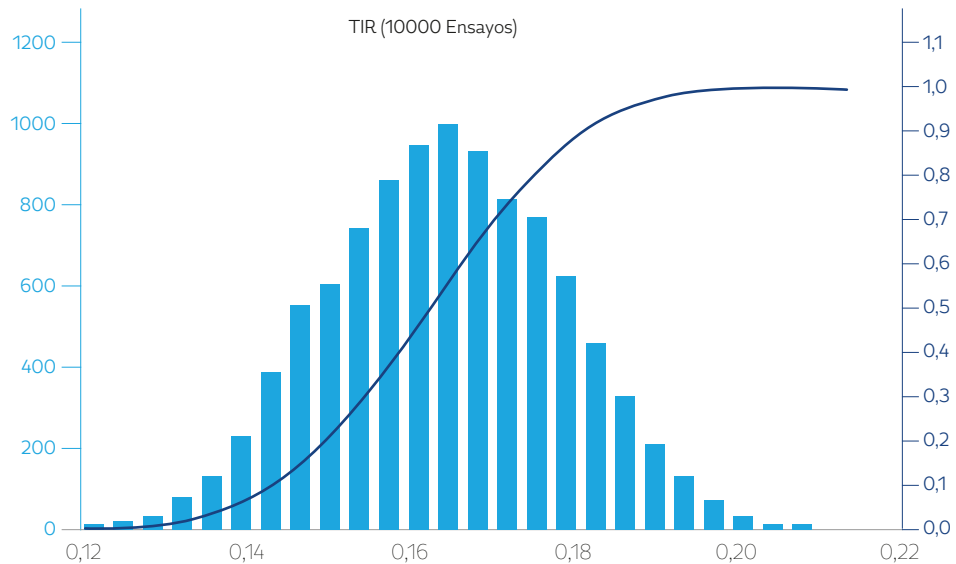


Estadísticas	Resultado
Número de pruebas	10000
Media	612.382.802,2777
Mediana	489.128.809,0625
Desviación Estándar	4.505.916.237,5917
Variación	2,030328E+019
Coficiente de Variación	7,3580
Máximo	16.215.394.134,8306
Mínimo	-12.470.697.806,2021
Rango	28.686.091.941,0328
Asimetría	0,1382
Curtosis	-0,2450
25% Percentil	-2.604.793.604,8948
75% Percentil	3.738.784.075,5563
Precisión de Error al 95% de confianza	14,4214%

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, como complemento de los resultados obtenidos con el VPN, se tiene que la TIR media es del 16,33 %, con valores máximos y mínimos de 20,88 y 11,86 %, respectivamente. Es así como, a pesar de tener un VPN positivo, la viabilidad financiera del proyecto no es apropiada bajo el entorno de estudio.

**Figura 2.** Simulación de la tasa interna de retorno (TIR)



Estadísticas	Resultado
Número de pruebas	10000
Media	0,1633
Mediana	0,1633
Desviación Estándar	0,0142
Variación	0,0002
Coefficiente de Variación	0,0873
Máximo	0,2088
Mínimo	0,1186
Rango	0,0902
Asimetría	-0,0011
Curtosis	-0,2770
25% Percentil	0,1533
75% Percentil	0,1734
Precisión de Error al 95% de confianza	0,1710%

Fuente: elaboración propia.

Analizando la viabilidad financiera del proyecto a través de las técnicas tradicionales, es conveniente valorar la opción de expansión, debido a la posibilidad de incluir una tercera turbina al proyecto de la PCH. Para valorar esta opción se procede en primer lugar a calcular la volatilidad según lo estipulado por [Mendoza y Gutiérrez \(2016\)](#) y [Bonis et al. \(2007\)](#), a través de un modelo EGARCH elaborado con base en una serie de los retornos diarios de los precios de la energía en el período enero del 2009 al 31 de mayo del 2019. Se seleccionó este modelo gracias a su mejor ajuste dadas las características de los datos, presentando estos cambios súbitos en las volatilidades y efectos asimétricos en las series de los retornos. El modelo EGARCH está definido como:

$$h^2_{t|t-1} = \omega + \beta_1 \sigma^2_{t-1|t-2} + \alpha_1 r^2_{t-1} \tag{3}$$

Donde:

$h^2$ : es la varianza condicional en el tiempo  $t$ .

$\omega$ : es una constante.

$r^2$ : son los retornos al cuadrado, los cuales son análogos a las innovaciones en un modelo ARMA.

$\beta$ : es el coeficiente que determina cómo los valores pasados de la volatilidad  $h^2$  afectan el valor presente de  $h^2$ .

$\alpha$ : es el coeficiente que determina cómo los valores pasados de los retornos al cuadrado,  $r^2$ , afectan el valor presente de  $h^2$ .

Se observa que el modelo EGARCH (1,1) propuesto subestima la varianza condicional de los retornos de la energía, lo cual podría estar explicado por su propiedad de simetría en lo que tiene que ver con las distribuciones de colas pesadas; además, por el hecho de que este no logra capturar el dinamismo propio de la serie. A partir del modelo EGARCH se calculó un valor para la desviación estándar condicional de 0,01211759, lo que se traduce en una volatilidad diaria del 1,21 %, equivalente al 19,24 % anual.

## 7. Valuación de la opción de expansión

La valuación de la opción real se realiza aplicando la técnica de árboles binomiales, para esto se procede en primera instancia a encontrar el árbol del subyacente. En este caso se necesitan los siguientes parámetros:

$T$ : tiempo en el que perdura la opción, seis años.

$\Delta t$ : tiempo de revisión de la opción, cada año.

$n$ : número de momentos que posee el árbol.

$u$ : parámetro de expansión (alza) del árbol del subyacente.

$d$ : parámetro de contracción (baja) del árbol del subyacente.

$\sigma$ : volatilidad de los flujos de caja, 19,24 %.

Establecidos los parámetros necesarios para construir el árbol del subyacente, se procede con los cálculos de los parámetros, comenzando con el número de momentos que posee el árbol, así:

$$n = \frac{T}{\Delta t} = \frac{6}{1} = 6 \text{ momentos} \quad (4)$$

Los parámetros de expansión y contracción serían:

$$u = e^{\sigma \sqrt{\Delta t}} = e^{0,1924 \sqrt{1}} = 1,21 \quad (5)$$

$$d = \frac{1}{u} = \frac{1}{1,21} = 0,83 \tag{6}$$

A continuación, se presenta el árbol del subyacente, el cual inicia con el valor presente de los flujos de caja del proyecto (VPFC). El árbol binomial del subyacente se construye multiplicando el VPFC por  $u$ , para encontrar el escenario positivo en el momento  $1$ , y se multiplica por  $d$  para encontrar el escenario negativo en el momento  $1$ . Estos dos escenarios serán la base para encontrar los demás escenarios en los restantes momentos, los cuales se encuentran de la misma manera en que se hizo para el momento  $1$ . La Tabla 4 muestra el árbol del subyacente.

**Tabla 4. Árbol del subyacente**

0	1	2	3	4	5	6
						195 413
					161 218	
				133 006		133 006
			109 731		109 731	
		90 529		90 529		90 529
	74 687		74 687		74 687	
61 618		61 618		61 618		61 618
	50 835		50 835		50 835	
		41 939		41 939		41 939
			34 600		34 600	
				28 545		28 545
					23 550	
						19 429

Valores en millones COP.

Fuente: elaboración propia.

Para continuar con el proceso de valuación de la opción real y elaborar el árbol del ejercicio se tomó en cuenta el costo de la nueva turbina necesaria para la expansión, la cual tiene un valor de 23 520 millones COP (precio de ejercicio) y con la que se incrementaría en un 30 % la capacidad de la PCH. Por otra parte, al tratarse de una opción de expansión, esta corresponde a una *Call* estadounidense, por lo tanto, el cálculo de cada uno de los momentos del árbol del ejercicio se desarrolla de la siguiente forma:

$$\text{Max} ((\text{VPFC} * 30 \% - \text{precio de ejercicio}); 0) \tag{7}$$

**Tabla 5. Árbol del ejercicio**

0	1	2	3	4	5	6
						35 104
					24 845	
				16 381		16 381
			9 399		0	
		3 638		3 638		3 638
	0		0		0	
0		0		0		0
	0		0		0	
		0		0		0
			0		0	
				0		0
					0	
						0

Valores en millones COP.

Fuente: elaboración propia.

Después de tener el árbol del ejercicio, se construyó el árbol de la opción “viva”. Es importante mencionar que, para el momento 6 de este árbol, se aplica la misma fórmula utilizada en el árbol del ejercicio, pero para los demás momentos se aplica la fórmula que se presenta a continuación, siendo el OV el árbol de la opción “viva” y E el árbol del ejercicio:

$$\frac{(\text{Max}(\text{alza 6 de la OV}; \text{alza 6 del E}) * q + \text{Max}(\text{baja 6 de la OV}; \text{baja 6 del E}) * (1 - q))}{(1 + r_f)^{\Delta T}} \quad (8)$$

Con base en los trabajos de [Scarcioffolo et al. \(2018\)](#) y [Fleten et al. \(2017\)](#), se procede a obtener la probabilidad neutral al riesgo  $q$ , utilizando la siguiente fórmula:

$$q = \frac{a - d}{u - d} \quad (9)$$

$$a = e^{r_f * \Delta T} \quad (10)$$

$$q = \frac{1,00 - 0,83}{1,21 - 0,83} = 0,46$$

Para la tasa libre de riesgo ( $r_f$ ) se utiliza la tasa efectiva de los *Treasury* a diez años, la cual, con ayuda de la devaluación y utilizando la ecuación de Fisher, se pasa de dólares a pesos; el resultado es 0,48 % efectivo anual. La Tabla 6 muestra los valores que posee la opción en los diferentes escenarios durante los seis años en los que se tiene la posibilidad de expandir la producción de la PCH.

**Tabla 6. Árbol de la opción “viva”**

0	1	2	3	4	5	6
						35 104
					24 957	
				16 606		16 381
			10 497		9 511	
		6 377		5 293		3 638
	3 754		2 861		1 681	
2 155		1 514		777		0
	788		359		0	
		166		0		0
			0		0	
				0		0
					0	
						0

Valores en millones COP.

Fuente: elaboración propia.

Con base en los datos obtenidos hasta el momento, en el árbol del ejercicio y el árbol de la opción “viva”, se procede a construir el árbol de escenarios correspondiente a la Tabla 7, donde el valor en cada escenario está dado por

$$\text{Max} (\text{árbol de la opción viva}; \text{árbol del ejercicio}) \tag{11}$$

**Tabla 7. Árbol de escenarios**

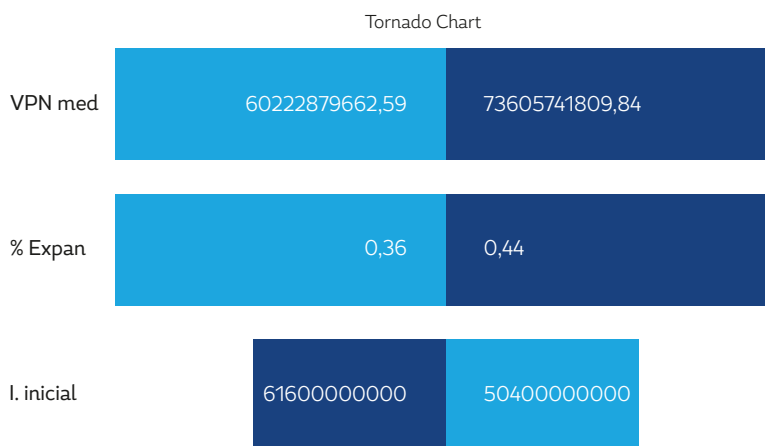
0	1	2	3	4	5	6
						EJERCER
					MANTENER	
				MANTENER		EJERCER
		MANTENER		MANTENER		EJERCER
	MANTENER		MANTENER		MANTENER	
MANTENER		MANTENER		MANTENER		EJERCER
	MANTENER		MANTENER		MANTENER	
		MANTENER		MANTENER		EJERCER
			MANTENER		MANTENER	
				MANTENER		EJERCER
					MANTENER	
						EJERCER

Fuente: elaboración propia.

El árbol de la opción viva nos arroja un valor de 2 155 715 601 COP y solo en los escenarios del año seis es prudente ejercer la opción, tal y como se observa en la Tabla 7, pues en los otros años el valor de mantenerla es mayor que si se ejerce. En esta parte del trabajo ya se puede calcular el valor total del proyecto, el cual sería: el VPN medio más la opción de expansión, lo que arroja un valor de 2 768 098 403 COP (612 382 802 COP + 2 155 715 601 COP). Es así como, basados en el resultado obtenido por las metodologías tradicionales de valoración, el proyecto de la PCH no es llamativo, por el valor bajo del VPN y una TIR por debajo de la tasa mínima requerida por los inversionistas; sin embargo, al utilizar las opciones reales y analizar la opción de expansión de la PCH, se percibió un ingreso adicional que no había sido considerado al inicio del estudio, el cual es de 2 155 715 601 COP, que sería el real atractivo financiero del proyecto.

Con el objeto de tener más información respecto a la opción de expansión, se realiza un análisis tipo tornado, al valor de la opción. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos.

**Figura 3.** Análisis tornado de la opción



Fuente: elaboración propia.

Del reporte mostrado en la Figura 3, podemos concluir que:

- Ante un cambio del 10 %, ya sea positivo o negativo en el valor del VPN, el valor de la opción cambia en un 24,54 % o un -24,54 % respectivamente.
- Ante un cambio del 4 %, ya sea positivo o negativo en el porcentaje de expansión de la opción, el valor de esta última cambia en un 24,54 % o un -24,54 % respectivamente.
- Ante un cambio del 10 %, ya sea positivo o negativo en la inversión inicial, el valor de esta última cambia en un 14,53 % a un -14,53 % respectivamente.



## 8. Conclusiones

La aplicación de opciones reales en la valoración de proyectos es una herramienta muy útil para la toma de decisiones financieras, ya que permite tener una visión más estratégica sobre el cómo, el cuándo y el porqué se deben realizar cambios en un proyecto, ya sea expansión, contracción, abandono y demás. En las valoraciones realizadas en el sector de energía con la aplicación de opciones reales se ha destacado el análisis de retrasar o postergar las inversiones, por lo que este estudio se centró en evaluar la opción de expansión de una PCH. Se demostró cómo, al considerar la opción, se puede obtener un valor adicional que no había sido tenido en cuenta por los métodos tradicionales de valoración. En el análisis del caso también se descubrió que variaciones en factores como el VPN, el porcentaje de expansión y la inversión inicial pueden afectar el valor total del proyecto.

Es importante mencionar otro elemento que puede afectar de manera positiva la viabilidad financiera del proyecto de la PCH. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el crecimiento de la demanda energética en Colombia será aproximadamente del 3 % a largo plazo, es decir, en un horizonte de doce años, la demanda de energía pasará de 74 835 GWh/año a 105 018 GWh/año aproximadamente. Además, por el lado de la oferta de energía, todas las proyecciones realizadas por la UPME contaban con la entrada en funcionamiento de Hidroituango, la cual se estimaba para finales del año 2018. Por otra parte, [Macías \(2018\)](#) plantea que la no entrada de este megaproyecto, saca del mercado de energía una capacidad de generación de 2400 MWh, lo que se tradujo en una diferencia entre la oferta y la demanda que, acompañada del fenómeno del niño que se pronosticó para diciembre del 2018, generarán un aumento importante en los precios de la energía y, por ende, de los ingresos estimados del proyecto.

## 9. Referencias

- Acevedo, N., Jiménez, L., & Agudelo, A. (2018). Evaluation of certified emission reductions in power generation project through real options. *Espacios*, 39(13).
- Agaton, C., & Karl, H. (2018). A real options approach to renewable electricity generation in the Philippines. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1). doi:10.1186/s13705-017-0143-y
- Ahumada V., & Andalaft, A. (2013). The methodology of real options: An application to the case of a paper company in the Biobio region, Chile. *Ingeniare*, 21(3), 337-346. doi:10.4067/S0718-33052013000300004
- Arango, M., & Botero, B. (2017). The application of real options as a tool for decision-making in the electricity market. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies*. doi: 10.23919/CIS-TI.2017.7975807
- Banco Central de Reserva de Perú (2019). Cuadros Estadísticos. Recuperado de <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series>
- Bjørngum, Ø. (2016). MNCs entering an emerging industry: The choice of governance mode under high uncertainty. *Cogent Business and Management*, 3(1). doi:10.1080/23311975.2016.1258135
- Bonis, S., Palenzuela, V., & Herrero, G. (2007). Real Options and Monte Carlo Simulation. *Universia Business Review*, 16, 52-63.
- Bonis, S., Palenzuela, V., & Herrero, G. (2009). Real options in the electricity sector. Endesa's expansion in Latin America. *Revista Española de Financiación y Contabilidad*, 12(38), 65-94.
- Cartea, Á., & González, C. (2012). How much should we pay for interconnecting electricity markets? A real options approach. *Energy Economics*, 34(1), 14-30. doi:10.1016/j.eneco.2011.06.002
- Cartea, A., & Jaimungal, S. (2017). Irreversible investments and ambiguity aversion. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 20(7). doi:10.1142/S0219024917500443
- Chen, S., Zhang, Q., Wang, G., Zhu, L., & Li, Y. (2018). Investment strategy for underground gas storage facilities based on real option model considering gas market reform in China. *Energy Economics*, 70, 132-142. doi:10.1016/j.eneco.2017.12.034
- Concha, A., Andalaft, A., & Farías, O. (2009). Coal gasification for power generation: Analysis with real options valuation. *Ingeniare*, 17(3), 347-359.
- Cuervo, F. (2015). Valuation of renewable and unconventional electricity sources: An approach from real options. *Cuadernos de Administración*, 28(51), 45-64. doi:10.11144/laveriana.cao28-51.vfrc
- Damodaran, A. (2019). Damodaran online. Nueva York, NY: New York University, Stern School of Business. Recuperado de <http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
- Fertig, E., Heggedal, A., Doorman, G., & Apt, J. (2014). Optimal investment timing and capacity choice for pumped hydropower storage. *Energy Systems*, 5(2), 285-306. doi:10.1007/s12667-013-0109-x
- Fleten, S., Haugom, E., & Ullrich, C. (2017). The real options to shutdown, startup, and abandon: U.S. electricity industry evidence. *Energy Economics*, 63, 1-12. doi:10.1016/j.eneco.2017.01.016
- Fleten, S., Linnerud, K., Molnár, P., & Tandberg, M. (2016). Green electricity investment timing in practice: Real options or net present value? *Energy*, 116, 498-506. doi:10.1016/j.energy.2016.09.114
- Gazheli, A., & Di Corato, L. (2013). Land-use change and solar energy production: A real option approach. *Agricultural Finance Review*, 73(3), 507-525. doi:10.1108/AFR-05-2012-0024
- Gónima, V. (2016). *Avances recientes en el uso de opciones reales en la evaluación de proyectos de generación de energía con fuentes alternativas* (tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Henao, A., Sauma, E., Reyes, T., & Gonzalez, A. (2017). What is the value of the option to defer an investment in Transmission Expansion Planning. An estimation using Real Options. *Energy Economics*, 65, 194-207. doi:10.1016/j.eneco.2017.05.001
- Jain, S., Roelofs, F., & Oosterlee, C. W. (2013). Valuing modular nuclear power plants in finite time decision horizon. *Energy Economics*, 36, 625-636. doi:10.1016/j.eneco.2012.11.012

- Macías, A. (2018). Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático. *Unidad de Planeación Minero Energética*, 1-107.
- Maya, C., Hernández, J., & Gallego, Ó. (2012). The valuation of eolic energy projects in Colombia under the real option approach. *Cuadernos de Administración*, 25(44), 193-231.
- Mendoza, G., & Gutiérrez, G. (2016). Energy and reserve genco's self-scheduling: Real option approach formulation. *Ingeniare*, 24(1), 70-84.
- Min, K., Lou, C., & Wang, C. (2012). An exit and entry study of renewable power producers: A real options approach. *Engineering Economist*, 57(1), 55-75. doi:10.1080/0013791X.2011.651566
- Ming, Z., Ping, Z., Shunkun, Y., & Ge, Z. (2016). Decision-making model of generation technology under uncertainty based on real option theory. *Energy Conversion and Management*, 110, 59-66. doi:10.1016/j.enconman.2015.12.005
- Nishimura, N. (2011). An application of the real options approach to R&D investment decision making in a service division of an energy firm. *International Journal of Services, Technology and Management*, 15(3-4), 218-238. doi:10.1504/IJSTM.2011.040377
- Otero, S., Andalaft, A., & Vásquez, E. (2008). The finite difference method in real options valuation. *Ingeniare*, 16(2), 232-243.
- Rohlfs, W., & Madlener, R. (2011). Valuation of CCS-ready coal-fired power plants: A multi-dimensional real options approach. *Energy Systems*, 2(3-4), 243-261. doi:10.1007/s12667-011-0034-9
- Santos, L., Soares, I., Mendes, C., & Ferreira, P. (2013). Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects. *Renewable Energy*, 68(C), 588-594.
- Scarcioffolo, A., Perobelli, F., & Chimeli, A. (2018). Counterfactual comparisons of investment options for wind power and agricultural production in the United States: Lessons from Northern Ohio. *Energy Economics*, 74(C), 299-309. doi:10.1016/j.eneco.2018.06.011
- Westner, G., & Madlener, R. (2012). Investment in new power generation under uncertainty: Benefits of CHP vs. condensing plants in a copula-based analysis. *Energy Economics*, 34(1), 31-44. doi:10.1016/j.eneco.2011.02.014
- Zhang, M., Zhou, P., & Zhou, D. (2016). A real options model for renewable energy investment with application to solar photovoltaic power generation in China. *Energy Economics*, 59(C), 213-226. doi:10.1016/j.eneco.2016.07.028