

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Trabajo Final de Maestría

**Avances recientes en el uso de opciones reales en la evaluación de proyectos de generación de energía con fuentes alternativas.**

Verónica Gónima Mena

Especialista en Ingeniería Financiera

Juan David Velásquez Henao, MSc, PhD

Profesor Titular

Director del Trabajo Final

Universidad Nacional de Colombia Facultad Nacional de Minas  
Departamento de Ingeniería de la Organización  
Programa de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Administrativa

Septiembre de 2016

## **DEDICATORIA.**

A Julia, Aaron y familia quienes me motivan y me enseñan a ser cada día mejor

## **AGRADECIMIENTOS.**

Gracias al Profesor Juan David Velásquez por su apoyo y compromiso para el buen desarrollo de este trabajo, sus consejos y su dedicación.

Gracias al Profesor Giovanni Pérez Ortega por la orientación prestada.

A Liz María Pérez Asia y Lina Yanet Velasco gracias a su colaboración han hecho este trabajo posible.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
1 METODOLOGÍA DE OPCIONES REALES .....	6
1.1 Opciones Financieras .....	7
1.2 Tipo de opciones reales.....	8
1.3 Antecedentes relacionados con la investigación.....	9
2 PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN .....	12
2.1 La necesidad de la revisión sistemática .....	12
2.2 Formulación de preguntas de investigación.....	13
2.3 Proceso de búsqueda.....	13
2.4 Definición de criterios de inclusión o exclusión.....	14
2.5 Evaluación de la calidad de los estudios.....	14
2.6 Extracción de los datos de los estudios individuales .....	14
2.7 Desviaciones del protocolo.....	14
3 RESULTADOS OBTENIDOS.....	15
4 DISCUSIÓN .....	33
4.1 P1: ¿Cuáles son las tecnologías planteadas en los estudios ya publicados?.....	33
4.2 P2: ¿Qué fuentes de incertidumbre son consideradas en los casos de estudio?.....	34
4.3 P3: ¿Cuáles tipos de opciones reales se han usado en la literatura? .....	37
4.4 P4: ¿Qué metodología de valoración se ha aplicado a las opciones reales en la literatura? .....	38
4.5 P5: ¿En qué países se ha aplicado el método de opciones reales en la literatura?.....	40
5 CONCLUSIONES .....	43
REFERENCIAS.....	45

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Métodos de valoración de proyectos de inversión en energía .....	11
Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa.....	17
Tabla 3: Revistas seleccionadas.....	29
Tabla 4: Evaluación de calidad de los artículos.....	30
Tabla 5: Número de artículos por tecnología.....	33
Tabla 6: Número de artículos por fuente de incertidumbre .....	35
Tabla 7: Número de artículos por Opción.....	37
Tabla 8: Número de artículos por país.....	41

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Pareto .....	15
Figura 2: Porcentaje de artículos publicados por año .....	28
Figura 3: Revistas Seleccionadas .....	30
Figura 4: Histograma de la calificación de artículos .....	32
Figura 5: Evolución de la tecnología. ....	34
Figura 6: Evolución de la tecnología. ....	34
Figura 7: Evolución por país .....	41
Figura 8: Evolución de artículos por país .....	42

## RESUMEN

Las opciones reales se han convertido en una de las metodologías más utilizadas en la evaluación de proyectos de inversión en energía, esto debido las particularidades propias del mercado (cambios, incertidumbres, regulaciones), además de las limitaciones que métodos tradicionales como el Valor Presente Neto *VPN* poseen, el objetivo de este trabajo es hacer una Revisión sistemática de la literatura de la mayoría de los artículos publicados entre el periodo de 2005 – 2015, que tengan como objetivo la evaluación de proyectos en energías alternativas a través de las opciones reales, esto pretende recoger metodologías, técnicas, fuentes de incertidumbre, y opciones reales más utilizadas, con el fin presentar una información estructurada que sirva como instrumento a futuros investigadores en esta temática, ya que resalta el estado actual de la investigación, de igual manera ayuda a generar futuras áreas de investigación, ya que la información sobre este tema se encuentra dispersa, y particularmente, la literatura existente en opciones reales dirigida a energías alternativas es escasa en Colombia. Se encuentra que la mayoría de los estudios analizados concluyen que las opciones reales es el método que genera mayor beneficio o reduce costos de los proyectos de inversión en energías alternativas.

**Palabras claves:** Incertidumbre, opciones reales, energías alternativas, precios, arboles binomiales.

## **ABSTRACT**

Real options have become one of the most used methodologies in the evaluation of energy investment projects, due to the particularities of the market (changes, uncertainties, regulations), in addition to the limitations that traditional methods such as Net present value *VPN* has. The objective of this work is to make a systematic literature review of most of the articles published between the years 2005 – 2010 inclusive, which have as the objective the evaluation of projects in alternative energies through real options. The aim is to collect methodologies, techniques, sources of uncertainty, and real options most used, in order to present structured information that serves as an instrument for future researchers in this area, as it highlights the current state of research, as well as to generate future areas of research. Since the information on this subject is dispersed, and in particular, the existing literature on real options directed at alternative energies is scarce in Colombia. It is found that most of the studies analyzed conclude that real options is the method that generates the most benefit or reduces costs of the investment projects in alternative energies.

**Keywords:** Uncertainty, real options, alternative energy, prices, binomial trees



## INTRODUCCIÓN

Las opciones reales como método para valorar los proyectos de inversión en la industria eléctrica han venido mostrando un aumento considerable en los últimos años, normalmente estos proyectos presentan particularidades propias del tipo de negocio, tales como: dinámica, ambiente cambiante, alto riesgo, dependencia de la variable física del mercado, aspectos regulatorios que rigen el mercado, demanda de la electricidad entre otros, las opciones reales capturan estas particularidades y evalúa el proyecto a partir de estas, causando que el resultado arrojado sea más preciso y eficaz, a diferencia de la metodología estática de un solo escenario en la cual se basa el VPN (Valor Presente Neto) y otros métodos tradicionales de evaluación de proyectos de inversión en energía.

Los proyectos de inversión involucran la toma de ciertas decisiones respaldadas por procesos y unas herramientas específicas, la primera de estas tiene que ver con la decisión de poner en marcha el proyecto; la segunda decisión está relacionada con la implementación de acciones que permitan a la empresa formular la estrategia adecuada para su desarrollo, y por último hay que decidir sobre los tiempos de implementación de la estrategia ya que la empresa puede manejar al menos las tres opciones que son: suspender, abandonar o posponer [1]. No obstante, algunos de estos proyectos presentan flexibilidad a la hora de decidir cuál es el mejor momento para invertir; en este contexto el inversionista requiere de metodologías que le permitan tomar la mejor decisión. Así, una metodología de evaluación es la teoría de opciones propuesta por Black y Scholes [2].

En Colombia la información sistematizada sobre la evaluación de proyectos de inversión energías alternativas a través de opciones reales es muy poca y dispersa, adicionalmente de aparecer la información sistematizada hay un vacío en la clasificación de esta.

En este trabajo se realiza a través de una revisión metódica y sistemática de la literatura, con el objetivo de hallar artículos cuya temática sea el uso de las opciones reales en la evaluación de proyectos de inversión en energías alternativas y así recoger toda información relacionada con las tecnologías utilizadas, fuentes de incertidumbre, métodos de valoración, países de aplicación, para luego agruparla y clasificarla, con el fin de identificar las resientes áreas de interés, avances y barreras de conocimiento en esta área de investigación, de igual manera también se pretende establecer cuál es la opción real más utilizada.

## **Interrogantes de la investigación**

Se propone entonces, que esta investigación resuelva las siguientes interrogantes: ¿Qué metodologías de valoración se han aplicado a las opciones reales en la literatura?, ¿Qué fuentes de incertidumbre son consideradas en los casos de estudio?, ¿Cuáles tipos de opciones reales se han usado en la literatura?, ¿Cuáles son los países donde se ha aplicado el método de opciones reales en la literatura? Al responder todos estos interrogantes se contará con una presentación de una información estructurada que permita identificar las resientes áreas de interés, metodologías y técnicas aplicadas.

La metodología que se va seguir para resolver estas preguntas de investigación es una revisión sistemática de la literatura la cual arrojó 51 artículos publicados en el periodo 2005-2015.

Este es un trabajo es presentado como requisito de la Maestría de profundización, el cual según el artículo 11 del acuerdo universitario número 033 de 2007, examina y actualiza el desarrollo de conocimientos, habilidades y destrezas disciplinarios que permiten el análisis orientado a la solución de problemas de carácter profesional. Es requisito para obtener el título de esta maestría la elaboración de un trabajo final equivalente a un máximo del 20% del total de créditos del programa curricular.

Este documento está estructurado de la siguiente manera: en el **Capítulo 1** se hace una descripción de las metodologías de opciones reales, aquí se encuentran las limitaciones que el VPN posee, una breve introducción a las opciones financieras, los tipos de opciones reales, y antecedentes relacionados con la investigación. En el **Capítulo 2** se describe la planeación de la investigación o protocolo de investigación; en el **Capítulo 3** se describen los resultados obtenidos; entre los cuales se encuentran que la metodología más usada para evaluar opciones reales es la simulación Montecarlo seguida de los árboles o mallas binomiales. Por otro lado; se puede inferir que la energía renovable más evaluada en estos estudios es la energía eólica, la cual posee una participación del 35% del total, seguida de los biocombustibles con 18% y la energía hidroeléctrica con un 12%. La energía eólica presenta su mayor auge de investigación en el periodo comprendido entre el 2009 – 2015. En cuanto a la opción con mayor número de investigaciones se encuentra la opción de diferir la inversión, la cual significa posponer su realización durante un tiempo determinando, dándole la opción al inversionista de esperar cual es el óptimo tiempo para invertir. Adicionalmente el país predominante en este tipo de investigaciones es Estados Unidos con una participación del 22% seguido por Brasil y China con un 8% de participación, los cuales comparten el segundo lugar con cuatro artículos cada uno.

En el **Capítulo 4** se discuten los resultados obtenidos, finalmente se concluye en el **Capítulo 5** que la mayoría de los estudios analizados concluyen que las opciones reales es el método que genera mayor beneficio o reduce costos de los proyectos de inversión en energías alternativas.

El aporte más significativo de este trabajo es el resumen de la literatura sistematizada del uso de las opciones en los proyectos de inversión con energías alternativas, el cual está estructurado en la Tabla 2, en el que se recoge las mejores prácticas propuestas por expertos en la temática, obteniendo así una clasificación sistematizada de la información y promover un mayor avance en el área de opciones reales en energías alternativas.

# 1 METODOLOGÍA DE OPCIONES REALES

Dado a las limitaciones que el modelo de VPN (Valor Presente Neto) posee, tal como no incluir en su evaluación las particularidades propias de los mercados de energía, tales como las condiciones climáticas, el cambio de la divisa, el flujo de agua, la velocidad del viento entre otras, se ve la necesidad de implementar el método de opciones reales el cual según [1], una opción real (OR) consiste en el derecho mas no la obligación de emprender una acción, como postergar, expandir, contratar o abandonar, a un costo predeterminado que se denomina costo de ejercicio y durante un período determinado que es la vida de la opción. Estas opciones surgen a partir de las opciones financieras como un enfoque en la valoración de la flexibilidad que se presenta en escenarios cambiantes.

Es pertinente profundizar acerca de las limitaciones que métodos tradicionales como el VPN poseen, lo que en parte resuelve el uso de las opciones reales, entre estas limitaciones se encuentran:

- a. Es estático: el VPN solo considera el periodo evaluado para los flujos de caja del proyecto; no surge la iniciativa de investigar qué sucedería si el mismo proyecto se vuelve a hacer en otro periodo de tiempo y con otras circunstancias [3].
- b. Flexibilidad: es decir, supone que el inversionista no hará ajustes durante la ejecución del proyecto sin importar el escenario que se presente.
- c. El proyecto no se puede posponer: “la inversión es, desde el inicio, irreversible e impostergable”. [3]

Es importante resaltar que las personas encargadas de ejecutar el proyecto y de aplicar la evaluación de este tengan un alto grado de conocimiento y experiencia de mercado en que se incursiona, ya que así se podrá ver cuáles son las oportunidades intangibles, las cuales son la base de las opciones reales [3].

En resumen las opciones reales pueden ser definidas como la valoración de la evolución de la incertidumbre del proyecto, la cual identifica, y formula acciones que son usadas por el inversionista para ajustar los proyectos a los ambientes cambiantes. La teoría de OR se basa en las ideas e instrumentos desarrollados por la valoración de las opciones financieras. [4]

## 1.1 Opciones Financieras

Antes de profundizar en el tema de Opciones Reales, es importante dar una breve explicación sobre las opciones financieras, estas surgen de la necesidad de disminuir factores directos de estimar el futuro (que aumentan el riesgo de la inversión), tales como la incertidumbre y la fuerte competitividad del mercado[3], lo anterior es similar a las OR ya que estas ajustan el proyecto a un tiempo y costo específico en función de un evento inesperado, en conclusión es lógico direccionar las OR con los instrumentos e ideas proporcionadas por las opciones financieras.

Las opciones financieras no son más que el derecho a comprar (opción de compra) o vender (opción de venta) un activo subyacente a un precio determinado en una fecha futura a cambio de una prima, donde el activo subyacente es el bien que se quiere vender o comprar, el precio determinado es el precio del ejercicio, la fecha futura es la fecha del ejercicio (dependiendo si la opción es de tipo americana: se puede ejecutar antes de su madurez, o bien si es de tipo europea: se puede ejecutar hasta su madurez), y finalmente la prima es el precio de la opción,[3].

Según [1] las OR involucran seis variables fundamentales, aunque no se descarta que se presenten más para el análisis:

- El valor del activo riesgoso subyacente, es decir, el valor del proyecto, en este caso es el valor presente de los flujos de caja esperados del proyecto de inversión.
- El precio de ejercicio, o sea, la cantidad de dinero que se invierte para ejercer la opción (en el caso de las opciones de compra) o que se recibe (en el caso de una opción de venta) y que, en este caso, son los costos hundidos.
- El tiempo de expiración de la opción, cuya prolongación hace aumentar el valor de la opción misma, que no es más que el tiempo de espera durante el cual la oportunidad de inversión en el proyecto es válida.
- La desviación estándar del valor del activo riesgoso subyacente. El valor de la opción aumenta con el riesgo del activo subyacente, ya que el valor pagado por la opción de compra depende del exceso del precio del activo sobre el precio de ejercicio, y la probabilidad de tal evento se incrementa al aumentar la volatilidad del activo subyacente. En nuestro caso se trata del riesgo que incumbe sobre el proyecto de inversión.
- La tasa de interés libre de riesgo sobre la vida de la opción, cuyo incremento hace que aumente el valor de la opción. En nuestro caso, asimilable al retorno de un título libre de riesgo con un período de madurez equivalente a la duración de la opción.
- Los dividendos que se pueden llegar a pagar por el subyacente, es decir, los flujos de caja entrantes o salientes durante la vida, o sea, los costos de preservar la opción del proyecto de inversión o bien los flujos de caja perdidos cuando un competidor toma la delantera en el ejercicio de la opción (si no existe un derecho monopolístico sobre ésta).

## 1.2 Tipo de opciones reales

Opciones de compra (call): opción de retardar el inicio de un proyecto (Deferral), opción de expandir un proyecto (option to expand) y opción de prolongar la vida de un proyecto (option to extend).

A continuación se desglosan las diferentes opciones de compra.

- La opción de esperar (Deferral): se encuentra en la mayoría de los proyectos de inversión. Se trata de una opción de compra Americana sobre el valor del proyecto del precio del ejercicio el cual es el dinero invertido al iniciar el proyecto. El contrato de arrendamiento es un ejemplo típico en el que la opción de esperar es notablemente valiosa.
- La opción de expandir / contraer (Expand): es una opción de tipo americana. Esta posee una alta flexibilidad, es decir la operación puede ser alterada en respuesta a las condiciones del mercado. La opción de ampliar o expandir un proyecto aportando más inversión es llamada compra americana (American Call). La opción de reducir por medio de la venta de una fracción de un proyecto es llamada una venta americana (American Put). En casos extremos, la producción puede ser detenida y reiniciada. Por otra parte, el propietario del activo flexible puede tener más de un punto de tiempo para ejercer la opción. En este caso, la opción es llamada de Bermuda (Bermudan option).

Opciones de venta (put): opción de abandonar un proyecto (option to abandon) y opción de vender una fracción de un proyecto (option to contractorscale back).

A continuación se desglosan las diferentes opciones de venta.

- La opción de abandonar (Abandon) un proyecto por un precio fijo es formalmente una venta americana (American put). Si las condiciones del mercado disminuyen severamente, el propietario del proyecto puede vender el proyecto de forma permanente, teniendo así un valor de rescate. Esta opción puede ser valiosa para inversiones de capital intensivo.
- La opción de intercambio (Switch) contiene una variedad de flexibilidades, la cual permite adaptarse a una estructura de costos más liviana para responder a un cambio adverso en la demanda. Las opciones de intercambio pueden ser vistas como opciones tipo put o call.

Otra de las opciones reales relevantes para este estudio es la opción compuesta, la cual se debe a la implementación de varias opciones reales, es decir la fase de inversión de la primera opción depende de del ejercicio anterior de la otra, también se define como una opción en una opción. La ganancia del ejercicio de una opción compuesta involucra el valor de otra opción. Una opción compuesta tiene entonces dos fechas de caducidad y los dos precios de ejercicio. Normalmente combina opciones de venta y compra, pero en algunos casos se puede utilizar opciones de compra y compra.

Desde esta perspectiva, las opciones de retardar, abandonar y prolongar en el tiempo un proyecto (sin excluir la posibilidad de expandir o vender fracciones del mismo) son de obligatoria consideración antes de la ejecución de cualquier tipo de proyecto. En efecto, la incertidumbre que suele caracterizar a este tipo de proyectos y que se debe a las condiciones variables del entorno se enfrenta mejor cuando se tiene más de una opción como alternativa, a diferencia de la evaluación de proyectos VPN, que arroja resultados simplemente en términos de SÍ/NO hacer la inversión

### **1.3 Antecedentes relacionados con la investigación.**

Debido a la carencia de información sistematizada que hay acerca de las opciones reales en la evaluación de proyectos en energía en Colombia, se ve la necesidad de desarrollar este trabajo de grado.

A continuación se realiza un recorrido histórico de las revisiones sistemáticas que sea desarrollado sobre la temática.

Durante la búsqueda de información, se encontró en [5] un artículo de la revista *Renewable and Sustainable Energy Review*, presentada en el 2008 con título *Valuation for renewable energy: A comparative review*, cuyo objetivo es revisar la literatura sobre valoración / evaluación de los recursos energéticos renovables y resumir los métodos utilizados en ellos. Aquí se desarrolla una tabla que contiene los estudios en evaluación de los recursos de energía renovable, describiendo el país del estudio, tipo de tecnología o recurso (foto volcánica, eólica, energía verde, entre otras), metodología (opciones reales, experimentos de elección, valor presente neto, etc) y por último los resultados de la metodología aplicada.

La conclusión más significativa del estudio anterior es que los proyectos que utilizan teoría de opciones y análisis de cartera contribuyen a reconocer y derivar el valor financiero de la flexibilidad de las ofertas de energía renovable. Este valor debe incorporarse en el valor total de las energías renovables. El valor de la flexibilidad es tal vez más apreciado y comprendido por los reguladores políticos, pero también debe explicarse al público en general, por ejemplo, la flexibilidad es un atributo que debe incluirse en la metodología de experimento de elección sobre energías renovables.

Uno de los artículos en los cuales esta investigación se apoya es [6] presentada en 2011, y que lleva por título “Real option theory applied to electricity generation projects : A review” aquí se hace un resumen de la literatura de las opciones reales dirigida a los proyectos de generación de energía, sin importar si son o no fuentes alternativas.

Este trabajo aporta información relevante tal como: el tipo de tecnología aplicada (genérica, Eólica, termal, hidroeléctrica entre otras), estado del proyecto (planeación, operación, desarrollo), tipo de incertidumbre (precio, costo, demanda) y tipo de herramienta de solución (árbol, ecuación diferencial, simulación).

Es importante destacar una de las conclusiones de este artículo la cual es: la literatura existente de las opciones reales dirigida a los proyectos de energía es escasa y como resultado una nueva investigación en la temática sería altamente valorada, ya que produce una contribución significativa al área de investigación.

Por ultimo [7] es el único artículo encontrado de la temática en Colombia, con título Aplicación de las opciones reales en la toma de decisiones en los mercados de electricidad, presentado en el 2013, cuyo objetivo es realizar una revisión de literatura analizando y clasificando aplicaciones de opciones reales sobre decisiones de inversión, operación, y de políticas y programas energéticos. Además presenta un ejemplo sintético de aplicación teórico utilizando un modelo binomial para incorporar energía eólica en vez de térmica de acuerdo con la volatilidad de los precios del carbón.

En esta publicación también se desarrolla una tabla que resume del estado del arte de las aplicaciones de las opciones reales en el sector energía, la cual contiene los grupos de evaluación (ecuaciones diferenciales, mallas y arboles binomiales, simulaciones) autores, año, objetivo (inversión, operación, I+D, etc), recurso o tecnología (petróleo, biomasa, térmica, gas etc) y tipo de opción (diferir, intercambio, mantener, etc). A diferencia de los artículos anteriormente nombrados, el autor hace un caso de estudio de la aplicación teórica. Es importante mencionar que en esta publicación no se enfatiza en energías alternativas.

Además se concluye que a pesar de encontrar varios trabajos reportados en la literatura, el uso de las opciones reales sigue siendo limitado en campos prácticos, y esta revisión presenta varias aplicaciones en los mercados de electricidad e ilustra con un ejemplo sintético la utilización de la herramienta.

En síntesis el análisis de todas estas revisiones sistemáticas y de los resultados, permite tener un mejor acercamiento sobre ciertos factores que merecen ser estudiados en profundidad con el fin de llenar el vacío de la clasificación del uso de opciones reales en la evaluación de proyectos de generación de energía con fuentes alternativas.

Muchos autores han aplicado varias metodologías para analizar la viabilidad de los proyectos de energía, sin embargo, algunos de estos son más apropiados que otros. Por lo dicho anteriormente, surge una pregunta acerca ¿Cuál es el mejor método para evaluar proyectos de inversión en energía?

A continuación la Tabla 1, muestra los diferentes métodos de evaluación utilizados en proyectos de inversión en energía.



Tabla 1 Métodos de valoración de proyectos de inversión en energía

Método	Definición	Solución Numérica	Criterio de decisión	Aplicación
Valor Presente Neto	Suma del valor presente de todos los flujos de caja generados por el proyecto, valor neto de las inversiones necesarias para la ejecución del proyecto Interno	$VPN = -\sum_{t=0}^{n-1} I_t/(1+i)^t + \sum_{t=1}^n NR_t/(1+i)^t$	$VPN > 0$	Energías Renovables en general, industria de Gas y Petróleo
Tasa Interna de Retorno Retorno Sobre la Inversión	La TIR representa la tasa de descuento que iguala el VPN a cero. El ROI es un valor que mide el rendimiento de una inversión	$0 = -\sum_{t=0}^{n-1} I_t/(1+IRR)^t + \sum_{t=1}^n NR_t/(1+IRR)^t$ $ROI = [\sum_{t=1}^n NR_t/(1+i)^t]/[\sum_{t=0}^{n-1} I_t/(1+i)^t]$	$IRR \text{ or } TIR > k$ $ROI > 1, VPN > 0$	Proyectos de inversión en Energías Renovables
Periodo de recuperación de la inversión	Periodo de tiempo requerido para recuperar la inversión	$PR = [\sum_{t=0}^{n-1} I_t/(1+i)^t]/[\sum_{t=1}^n NR_t/((1+i)^t/n)]$	$PR < n$	Proyectos de inversión en Energías Renovables
Relación Costo Beneficio	Identifica, cuantifica y evalúa los beneficios y los costos de los proyectos de inversión	$B/C = [\sum_t (R_t - C_t)/(1+i)^t]/[\sum_t I_t/(1+i)^t]$	$B/C > 1$	Proyectos de inversión en Energías Renovables
Costo Nivelado de la Energía	Comparación de las tecnologías de generación de energía con diferentes características y tiempos de vida	$LC = (C_I + C_{O\&M} + C_c + C_d)/E_{act}$	Menor Costo Nivelizado	Proyectos de inversión en Energías Mercados de Energía
Opciones Reales	Reformula el VPN en los escenarios de gran incertidumbre que componen las inversiones.	$VPN \text{ Expandido} = VPN \text{ Tradicional} + \text{Valor de la Opción Real}$	$VPN \text{ Expandido} > 0$	Energías Renovables en general, industria de Gas y Petróleo Mercados de Energía Generación de Energía

Terminología: It: Flujo de efectivo en el periodo t; NRt: Ingresos netos en el periodo t; i: Tasa de descuento; IRR: Tasa Interna de Retorno; k: Tasa de interés o Costo de oportunidad del capital; n: Número de años ; Rt - Ct: Flujo de caja en el periodo t; CI: Costo presente de la inversión; CO&M: Valor presente de la operación & Costo de Mantenimiento; Cc: Valor presente de los costos de combustible; Cd: Valor presente de varios costos anuales; Eact: Valor presente acumulado de producción de energía.

Tabla elaborada a partir de [8]

## 2 PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

La revisión sistemática de literatura planteada por Kitchenham, [9], [10] está basada, principalmente en las metodologías de investigación basadas en evidencias, la cual permite eliminar sesgos de búsqueda, y facilita evitar las restricciones del proyecto de investigación.

La revisión sistemática de literatura cuenta con tres etapas, tal como lo propone [11], estas serían:

- Planificación de la revisión
- Desarrollo de la revisión
- Publicación de resultados

El fin de estas etapas es brindar el menor sesgo de la información ya que proporciona la mejor evidencia disponible en la literatura.

En esta sección se describen también los pasos para hacer una adecuada revisión sistemática los cuales son:

- El porqué de la revisión sistemática
- formulación de preguntas de investigación
- proceso de búsqueda
- definición de criterios de inclusión o exclusión
- evaluación de la calidad de los estudios
- extracción de los datos de los estudios individuales
- desviaciones del protocolo.

### 2.1 La necesidad de la revisión sistemática

Esta investigación, surge de la necesidad de encontrar los avances y limitaciones del uso de opciones reales en la evaluación de proyectos de generación de energía con fuentes alternativas en la actualidad, además de proporcionar antecedentes que permitan generar nuevas actividades de investigación sobre la temática aquí tratada. Esta revisión resume y clasifica la información existente en el tema.

## **2.2 Formulación de preguntas de investigación**

Las preguntas de investigación fueron diseñadas con el fin de determinar cuáles son las prácticas aceptadas actualmente en la temática.

A continuación se enumeran estas preguntas:

P1: ¿Cuáles son las tecnologías planteadas en los estudios ya publicados?

P2: ¿Qué fuentes de incertidumbre son consideradas en los casos de estudio?

P3: ¿Cuáles tipos de opciones reales se han usado en la literatura?

P4: ¿Qué metodologías de valoración se han aplicado a las opciones reales en la literatura?

P5: ¿Cuáles son los países donde se ha aplicado el método de opciones reales en la literatura?

La pregunta de investigación P1 tiene como fin encontrar las energías alternativas más usadas en los proyectos de inversión de energía con opciones reales y su evolución a través del tiempo.

La pregunta de investigación P2 arroja las fuentes de incertidumbre más usadas en la investigación, esto con el fin de hallar la tendencia que tiene su uso, además de concluir la importancia de su consideración.

La pregunta de investigación P3 tiene como fin determinar las opciones reales más usadas, su tendencia y su importancia a la hora de decidir en momento indicado para invertir.

La pregunta de investigación P4 tiene como fin mapear las principales metodologías planteadas para la valoración de la opción real, de la diferencia entre ellos, su aplicación y tendencia.

La pregunta de investigación P5 se establece con el fin de determinar cuál es el país que más invierte en la implementación de energías alternativas y en la eliminación de combustibles fósiles.

Las respuestas a estas preguntas de investigación se discuten en el Capítulo 4.

## **2.3 Proceso de búsqueda**

Para el proceso de búsqueda se consultó en bases de datos electrónicas indexadas: IEEE Xplore, Google Scholar, y Scopus. En idioma original, sin traducir. (De preferencia Inglés), a través de una búsqueda manual a partir de la combinación de una serie de palabras claves (y sinónimos) que se han identificado como relacionadas con el área o tema, las cuales se describen en el siguiente apartado.

## **2.4 Definición de criterios de inclusión o exclusión.**

Se incluyeron únicamente los artículos relacionados con la temática de método de opciones reales aplicado a las Energías Alternativas. Se excluyeron los artículos relacionados con la temática de método de opciones reales aplicado a los combustibles fósiles u otros tipos de temas tales como: opciones reales en la construcción, opciones reales en los automóviles híbridos, opciones reales aplicadas en las baterías de energía, etc.

## **2.5 Evaluación de la calidad de los estudios**

A los artículos hay que evaluarlos en calidad, con el fin encontrar aquellos artículos que posean la información más completa para el análisis, esta evaluación se formula a partir de las preguntas de investigación anteriormente planteadas a las cuales se les asignan una calificación de 2 en el caso de que el artículo contesta la pregunta establecida y 0 si no; según el orden de ideas a la calificación máxima de las calificaciones individuales será de 12, y la mínima de 0

## **2.6 Extracción de los datos de los estudios individuales**

Los datos extraídos de cada publicación fueron los siguientes:

- Autor o Autores
- Título
- Año de publicación.
- Revista
- Cantidad de citas al artículo.
- Fuentes de Incertidumbre
- Lugar donde se hace el estudio
- Tipo de opción real
- Tipo de investigación: Metodología o aplicación.
- Tecnologías
- Metodología de valoración.

## **2.7 Desviaciones del protocolo.**

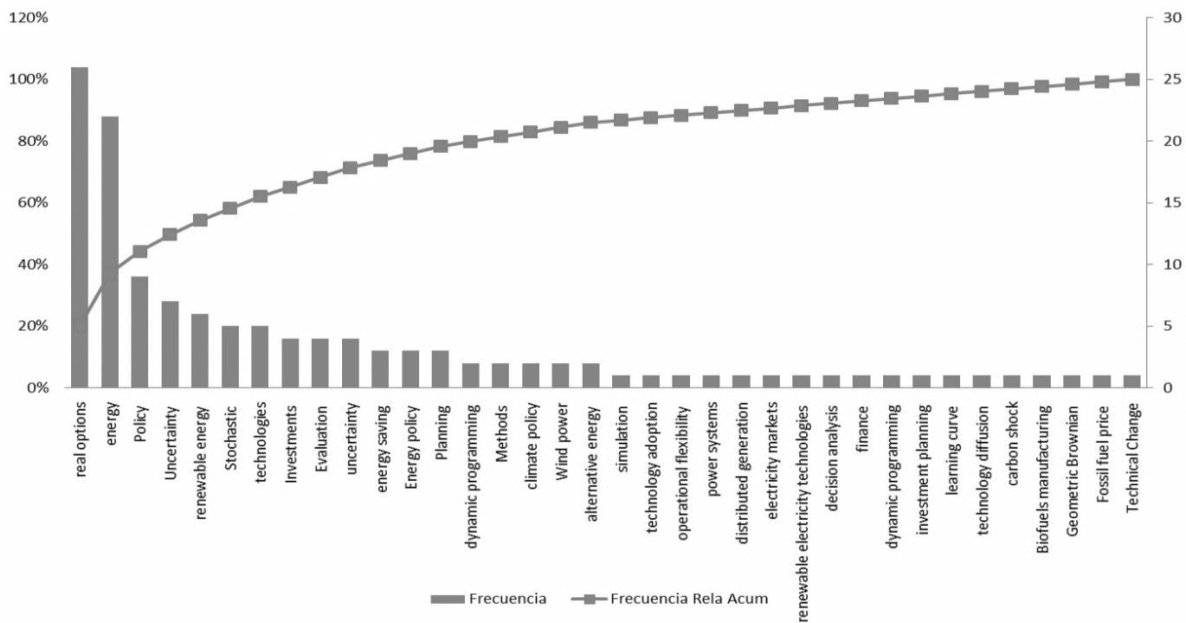
No se consideraron desviaciones del protocolo de investigación, se supondrá que la información recolectada es cierta dada su procedencia ya que son artículos indexados los cuales tuvieron que pasar por un proceso de evaluación.

### 3 RESULTADOS OBTENIDOS

El proceso de búsqueda utilizado fue el siguiente: inicialmente se realizó una búsqueda de palabras claves de los artículos base, luego de ordenarlas según frecuencia e importancia se obtuvo el Figura 1, esta muestra un Diagrama de Pareto, el cual contiene los pocos vitales, es decir las palabras claves con mayor relevancia, encontrándose así un 80% las palabras (real options, energy y uncertainty), las cuales servirán de base para hallar los sinónimos, con el fin de generar una mejor búsqueda.

Este tipo de diagramas es comúnmente utilizado en calidad, con el fin de encontrar las causas de los problemas más comunes en una empresa, por medio de análisis de frecuencia u ocurrencia.

Figura 1: Diagrama de Pareto



Fuente: Elaboración propia

El resultado de este diagrama de Pareto son las siguientes palabras claves con sus respectivos sinónimos o tesauros:

Real options + Real options analysis  
Real options Case + Real options Model  
Energy policy + Energy  
Renewable energy + Alternatives energy + Sustainable energy  
Technologic + Technologies

La búsqueda se centró en todas aquellas publicaciones que incluyeran las palabras real options, energy o Uncertainty, alternative, o renewable o sustainable, en los siguientes campos: título, resumen y palabras claves.

Cabe destacar que esta búsqueda no tiene ningún tipo de restricción, acerca de fecha, o tipo de artículo.

La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente: (TITLE-ABS-KEY(real options) AND TITLE-ABS-KEY(energy OR uncertainty) AND TITLE-ABS-KEY(alternative OR renewable OR sustainable))

Esta cadena arrojó manuscritos comprendidos entre los años 1975 al 2016.

Al aplicar la búsqueda diseñada, se recuperaron los 51 artículos, de los 80 resultantes esto debido a que dentro de los 80 artículos iniciales, 26 de ellos no provenían de revista indexadas, o no fueron escritas en idioma inglés. En la Tabla 3 aparecen listados estos 51. Se encontraron 6 artículos de más de 40 citaciones, escritos después del año 2005. El primer lugar de los artículos publicados más citados, es para la revista Energy Economics con el artículo más citado, escrito por Kumbaroglu G., Madlener R., Demirel M., en 2008 (artículo más citado en los últimos 8 años), este describe un modelo de programación dinámica en la industria del gas, el cual tiene capacidad para un periodo de evaluación con alternativas de inversión durante condiciones de incertidumbre.

En la Tabla 2 se listan los artículos con los cuales se responderán las preguntas de investigación planteadas.

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa.

Titulo	Autor	Tecnología	Opción	Fuentes de Incertidumbre	Metodología de evaluación de la Opción Real	Año	Cita	Origen	Ref.
A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies	Kumbaroglu G., Madlener R., Demirel M.,	Gas	Diferir	Precios de la electricidad, precios del Combustible	Programación Dinámica y curvas de aprendizaje, los precios se comportan con Movimiento browniano geométrico (GBM)	2008	81	Turquia	[12]
Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects	Bockman T, Fleten S-E, Juliussen E, Langhammer H, Revdal I	Hidroeléctrica	Diferir	Precio de la electricidad	Movimiento browniano geométrico para el margen de contribución. Simulación física de las pequeñas centrales hidroeléctrica	2008	48	Noruega	[13]
Renewable energy policy evaluation using real option model - The case of Taiwan	Lee S.-C., Shih L.-H.,	Eólica	Expandir	Precio de combustible	Arboles Binomiales/GBM	2010	43	Taiwan	[14]
Real options valuation of US federal renewable energy research, development, demonstration, and deployment	Siddiqui A.S., Marnay C., Wisner R.H.,	Energías Renovables en general	Diferir/expandir	Costo de la Energía Renovable	Simulación cuando los árboles binomiales se hacen inviables, El movimiento del costo de la Energía renovable tiene comportamiento GBM	2007	43	US	[15]

Tabla 3: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach	Boomsma T.K., Meade N., Fleten S.-E.,	Eólica	Diferir	cambio de régimen de subsidios, Precios de la electricidad	Monte Carlo al precio de la opción, Markov modulada movimiento browniano geométrico rige los pagos de subvenciones	2012	34	Países nórdicos	[16]
Electric power generation planning for interrelated projects: a real options approach	Wang C-H, Min K	Energías Renovables en general	Expandir	Mercado	GBM para calcular la evolución del mercado y programación dinámica para demostrar la decisión a tomar.	2006	29	US	[17]
How to proceed with competing alternative energy technologies: A real options analysis	Siddiqui A., Fleten S.-E.,	Energías Renovables en general	Expandir	precio de la electricidad y el costo de operación	Escenarios, el comportamiento del precio del combustible por GBM	2010	24	Inglaterra	[18]
Renewable energy investment: Policy and market impacts	Reuter W.H., Szolgayova J., Fuss S., Obersteiner M.,	Carbón y Eólica	Expandir	Marco político y normativo; Incertidumbres ambientales	Ecuación de Bellman y Simulación Montecarlo al promedio de plantas eólicas	2012	23	Alemania	[19]
Ethanol plant investment using net present value and real options analyses	Schmit T.M., Luo J., Tauer L.W.,	Biocombustible	Diferir/ Expandir	Precio del combustible	los precios se manejan con GBM, Ecuaciones diferenciales	2009	19	US	[20]
Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach	Marreco J.d.M., Carpio L.G.T.,	Térmica	Intercambio	Precios de la electricidad y demanda	Modelo binomial de probabilidades	2006	19	Brasil	[21]



Tabla 4: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Investment in wind power and pumped storage in a real options model	Reuter W.H., Fuss S., Szolgayova J., Obersteiner M.,	Eólica y Hidroeléctrica	Intercambio	carga de viento	Comparación en costos de las Tecnologías	2012	18	Alemania y Noruega	[22]
Valuing Chinese feed-in tariffs program for solar power generation: A real options analysis	Lin B., Wesseh Jr. P.K.	Solar	Diferir	Precio del combustible	Malla binomial estocástica, GBM a los cambios del costo de la Energía renovable	2013	16	China	[23]
Real options model to evaluate infrastructure flexibility: An application to photovoltaic technology	Calabrese A., Gastaldi M., Ghiron N.L.,	Fotovoltaica	Opciones Reales en General	Demanda	Modelo matemático para elegir una inversión estratégica en la industria fotovoltaica	2005	15	US	[24]
Valuation of projects for power generation with renewable energy: A comparative study based on real regulatory options	Monjas-Barroso M., Balibrea-Iniesta J.,	Eólica	Expandir	1. Los costos de inversión. 2. Precio de la electricidad. 3. Índice de Precios al Consumidor. 4. La energía eléctrica producida.	Comparación Árbol binomial y Monte Carlo flujo de caja con GBM	2013	12	Dinamarca, Finlandia y Portugal	[25]
Entry into the electricity market: uncertainty, competition, and mothballing options	Takashima R, Goto M, Kimura H, Madarame H	Térmica Y Nuclear	Retirar	La demanda y precio de la energía	Simulaciones Monte Carlo	2008	11	Tokio	[26]

Tabla 5: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Assessment of domestic photovoltaic systems based on real options theory	Martinez-Cesena E.A., Azzopardi B., Mutale J.,	Fotovoltaica Domestica	Diferir	Costo del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos debido a las emisiones de gases de invernadero, en el mercado comercial.	Escenarios	2013	10	Inglaterra	[27]
Using real option analysis for highly uncertain technology investments: The case of wind energy technology	Lee S.-C.,	Eólica	Diferir	Precio del combustible	Ecuaciones diferenciales. GBM	2011	10	Taiwan	[28]
Wind power projects planning considering real options for the wind resource assessment	Martinez-Cesena E.A., Mutale J.,	Eólica	Posponer	Velocidad del viento	Simulación Montecarlo/Escenarios	2012	8	US	[29]
Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects	Santos L., Soares I., Mendes C., Ferreira P.	Hidroeléctrica	Posponer	Volatilidad de los precios de la electricidad	Árbol binomial	2014	7	Portugal	[8]
Real options approach to renewable energy investments in Mongolia	Detert N., Kotani K.,	Energías Renovables en general	Diferir	Precio del carbón	Ecuaciones diferenciales, GBM	2013	7	Mongolia	[30]

*Tabla 6: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)*

Real options valuation of fusion energy R&D programme	Bednyagin D., Gnansounou E.,	Nuclear	Modularidad	Precio de la electricidad	ecuaciones diferenciales y métodos binomial	2011	6	N/A	[31]
Using real option analysis to quantify ethanol policy impact on the firm's entry into and optimal operation of corn ethanol facilities	Maxwell C., Davison M.	Biocombustible	Intercambio	Precios futuros	Ecuaciones Diferenciales, Monte Simulación Monte Carlo.	2014	5	US	[32]
A real option model for renewable energy policy evaluation with application to solar PV power generation in China	Zhang M., Zhou D., Zhou P.	Solar Fotovoltcanica	Expandir	Costo de la energía no renovable, precio del carbón, el costo de la energía renovable y precio de subsidio	Escenarios, Arboles binomiales	2014	5	China	[33]
The carbon market incremental payoff in renewable electricity generation projects in Brazil	Batista F, Geber de Melo A, Teixeira J, Baidya T	Hidroeléctrica	Expandir	Precio del carbón	modelo NEWAVE aplicado a escenarios	2011	5	Brasil	[34]
Electricity and combined heat and power from municipal solid waste	Tolis A., Rentizelas A., Aravossis K., Tatsiopoulou I.,	Biocombustible	Modularidad	Precios de la electricidad, precios del petróleo, precios de los permisos de CO2, tasas de interés y tasas de inflación.	GBM, Escenarios	2010	5	Grecia	[35]

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Generation investment decision-making in emission trading environment with multiple uncertainties	Xun B., Wen F., Li X., Wen A., Fu C.	Eólica/Nuclear y otras		Precio de la electricidad /Precio del combustible	Simulación Monte Carlo	2014	3		[36]
A valuation of wind power projects in Germany using real regulatory options	Barroso M.M., Inieta J.B.	Eólica	Expandir	Costo de Inversión, energía producida, precio de la electricidad, Índice precio del consumidor	Modelo de difusión de salto para la incertidumbre. Simulación Monte Carlo para el valor de la opción	2014	3	Alemania	[37]
Evaluation of new and renewable energy technologies in Korea using real options	Jang Y.-S., Lee D.-J., Oh H.-S.,	I&D	Diferir/Abandonar/Continuar	Precio del combustible	GBM Arbol binomial de probabilidades	2012	3	Corea	[38]
A public policy aid for bioenergy investment: Case study of failed plants	Gonzalez A.O., Karali B., Wetzstein M.E.,	Biocombustible	Invertir/Abandonar	Precios futuros	(GBM) Ecuaciones diferenciales	2012	3	US	[39]

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Using a spark-spread valuation to investigate the impact of corn-gasoline correlation on ethanol plant valuation	Kirby N., Davison M.,	Biocombustible	Intercambio	Precio del combustible, precios históricos del maíz	Reversion de la media Simulaciones	2010	3	Datos (Commodity Research Bureau, 2007).	[40]
Analysis of a power plant investment opportunity under a carbon neutral world	Yun T., Baker R.D.,	Nuclear	Expandir	Precio de la electricidad y costo de la inversión	Reversion de la media Simulaciones Monte Carlo ecuaciones diferenciales	2009	3	Noruega	[41]
Real options analysis for renewable technologies in a GHG emissions trading environment	Sarkis J, Tamarkin M	Fotovolcanica	Posponer	precio de ejercicio de la tecnología precio de cotización de mercado de las emisiones de gases de efecto invernadero	Simulaciones Monte Carlo	2008	3	N/A	[42]
Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case	Jeon C., Lee J., Shin J.	Fotovolcanica	Compuesta	Radiación Solar anual Tasa de interés tasa de cambio Sistema Marginal de precio	Simulación Monte Carlo, Modelo de Dinámica de sistemas	2015	2	Corea	[43]

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Time-dependent opportunities in energy business: A comparative study of locally available renewable and conventional fuels	Tolis A.I., Rentizelas A.A., Tatsiopoulos I.P.,	Biomasa	Invertir	Precio del combustible, Precio de la electricidad	GBM, Ecuaciones Diferenciales Estocásticas, Monte Carlo	2010	2	Grecia	[44]
Switching outputs in a bioenergy cogeneration project: A real options approach	De Oliveira D.L., Brandao L.E., Igrejas R., Gomes L.L.	Biomasa	Intercambio	Precio de la electricidad a corto plazo.	Proceso de Media Reversiva con Saltos	2014	1	Brasil	[45]
Valuation of wind energy projects: A real options approach	Abadie L.M., Chamorro J.M.	Eólica	Invertir	Precio de la electricidad	GBM, Malla Trinomial para la opción y Monte Carlo	2014	1	Inglaterra	[46]
Applying the real option approach on nuclear power project decision making	Shi H.Y., Song H.T.	Nuclear	Abandonar/Diferir	Precio de la electricidad	GBM, Ecuaciones Diferenciales	2013	1	China	[47]
The value of operational flexibility by adding thermal to hydropower a real option approach	Kjaerland F, Larsen B	Hidroeléctrica y térmica	Intercambio	Nivel del depósito de agua y el precio del combustible	Simulación	2009	1	Noruega	[48]

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Assessment of offshore wind energy projects in Denmark. A comparative study with onshore projects based on regulatory real options	Iniesta J.B., Barroso M.M.	Eólica	Diferir	índice precio del consumidor, costo de inversión, precio de la electricidad, electricidad producida	Simulación Monte Carlo	2015	0	Dinamarca	[49]
Uncertainty, Irreversibility, and Investment in Second-Generation Biofuels	McCarty T., Sesmero J.	Biocombustible	Diferir	Volatilidad del Precio de la gasolina,	GBM, Ecuaciones de Bellman	2015	0	US	[50]
Energy reserve trade optimization for wind generators using black and scholes options in small-size power systems	Ghaffari R., Venkatesh B.	Eólica	Intercambio	Precio de la electricidad, Precio de la reserva de viento	Distribución Gaussiana, Modelo Black y Scholes	2015	0	Ontario, Canada	[51]
Renewable energy investment project evaluation model based on improved real option	Dai C.-Y., Wang Y.-X., Li D., Zhou Y.-L.	Eólica	Invertir	Precio del combustible	Riesgo Ajustado del VPN y Modelo B-S Formula	2015	0	China	[52]
Is now a good time for Iowa to invest in cellulosic biofuels? A real options approach considering construction lead times	Li Y., Tseng C.-L., Hu G.	Biocombustible	Diferir	Precio del combustible	Simulación Monte Carlo, GMR	2015	0	IOWA US	[53]

Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

Risk Analysis of Wind Energy Investments in Turkey	Onar S.Ç., Kılavuz T.N.	Eólica	Compuesta	Producción de energía, costo de inversión y el precio de la electricidad	GBM, Simulación Monte Carlo	2015	0	Turquia	[54]
Risk neutral and risk averse approaches to multistage renewable investment planning under uncertainty	Bruno S., Ahmed S., Shapiro A., Street A.	Hidroeléctrica y Eólica	Diferir	Flujo de agua	Doble Programación Dinámica, Escenarios	2015	0	Brasil	[55]
Distributed solar renewable generation: Option contracts with renewable energy credit uncertainty	Zeng Y., Klabjan D., Arinez J.	Solar	N/A	Precio de la electricidad, Demanda y Precio de la Energía Renovable	GBM, Simulación Monte Carlo	2015	0	US	[56]
Real option analysis for renewable energy investment under uncertainty	Sheen J.-N.	Eólica	Invertir	Flujo de caja esperado	Opción Real difusa	2014	0		[57]
Evaluation of R&D investments in wind power in Korea using real option	Kim K.-T., Lee D.-J., Park S.-J.	Eólica	Abandonar Continuar Empezar	Precio del combustible	GBM, Malla binomial	2014	0	Corea	[58]

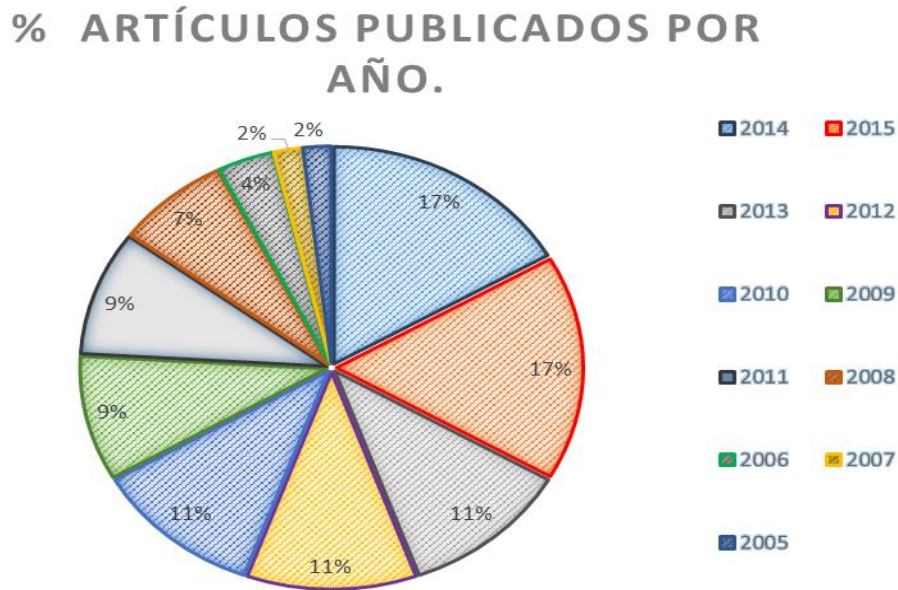


Tabla 2: Resumen de la literatura dirigida al uso de las opciones reales en los proyectos de energía alternativa. (Continuación)

A real options optimization model to meet availability requirements for offshore wind turbines	Haddad G., Sandborn P., Pecht M.,	Turbinas Eólicas	Esperar a implementar el mantenimiento	El precio de mercado de la energía, las condiciones meteorológicas	Simulación, Programación dinámica	2011	0	US	[59]
Real options valuation of a wind farm	Mendez M, Goyanes A, Lamothe P	Eólica	Invertir	Precio de la electricidad, producción anual, Cambio del EURO	Simulación Monte Carlo/Malla Binomial	2009	0	N/A	[60]
Risk assessment of investment strategy in distributed energy system under uncertainty of fuel and electricity prices	Ariki W., Asano H., Koda E., Bando S.,	Fotovolcanica	Opciones Reales en General	Precio de la electricidad, Precio de gas natural	GBM	2009	0	Tokio, Japón	[61]

En la Figura 2, se muestra el porcentaje de artículos recuperados por año de publicación

Figura 2: porcentaje de artículos publicados por año



*Fuente: Elaboración propia*

De la Figura anterior se puede inferir que el tema de opciones reales en energías alternativas ha desarrollado mayor interés en investigadores a través de los años, con un 67% en el periodo comprendido entre 2010-2015, debido a que el método de opciones reales da flexibilidad a la hora de invertir, el VPN no, también debido al aumento en el desarrollo de tecnologías alternativas y a la eliminación de combustibles fósiles.

Por otro lado en la Tabla 3 se reportan las publicaciones seriadas en las cuales se publicó, al menos un artículo de interés para esta investigación.

*Tabla 7: Revistas seleccionadas*

<b>Fuente</b>	<b>Número de artículos</b>	<b>Total citaciones</b>
Renewable and Sustainable Energy Reviews	9	58
Energy Economics	7	167
Energy Policy	6	87
European Journal of Operational Research	3	82
Applied Energy	2	25
Engineering Management	1	29
Biomass and Bioenergy	1	19
International Journal of Technology Management	1	15
Progress in Photovoltaics: Research and Applications	1	10
IEEE Transactions on Sustainable Energy	1	8
Renewable Energy	1	7
International Journal of Energy Research	1	5
Waste Management and Research	1	5
Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	1	3
Energy	1	3
Emissions Trading	1	3
Investment Management and Financial Innovations	1	3
Energies	1	1
Journal of Applied Operational Research	1	1
Energy Procedia	1	1
Lecture Notes in Electrical Engineering	1	0
Bioenergy Research	1	0
IEEEJ Transactions on Power and Energy	1	0
International Journal of Production Economics	1	0
Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME	1	0
ESIC Business and Marketing	1	0
Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering	1	0
Human and Ecological Risk Assessment	1	0
Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)	1	0
<b>Grand Total</b>	<b>51</b>	<b>532</b>

En la Figura 3 se hace un *word cloud* o nube de palabras para describir las revistas seleccionadas en la investigación, el mayor tamaño corresponde a las palabras que aparecen con más frecuencia.

Figura 3: Revistas Seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 3 y Figura 3, se concluye que la revista predominante en la temática de opciones reales en proyectos de inversión con energía alternativas es Renewable and Sustainable Energy Reviews con 9 publicaciones seguida de Energy Economics con 7 y Energy Policy con 6.

A continuación en la Tabla 4 se hace referencia a la evaluación de la calidad de los artículos seleccionados.

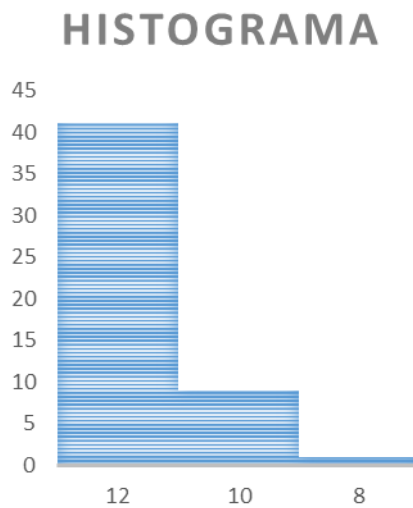
Tabla 8: Evaluación de calidad de los artículos

<i>Titulo</i>	<i>Calificación</i>	<i>Ref</i>
A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies	12	[7]
Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects	12	[8]
Renewable energy policy evaluation using real option model - The case of Taiwan	12	[9]
Real options valuation of US federal renewable energy research, development, demonstration, and deployment	12	[10]
Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach	12	[11]
Electric power generation planning for interrelated projects: a real options approach	12	[12]
How to proceed with competing alternative energy technologies: A real options analysis	12	[13]
Renewable energy investment: Policy and market impacts	12	[14]
Ethanol plant investment using net present value and real options analyses	12	[15]
Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach	10	[16]
Investment in wind power and pumped storage in a real options model	12	[17]
Valuing Chinese feed-in tariffs program for solar power generation: A real options analysis	12	[18]
Real options model to evaluate infrastructure flexibility: An application to photovoltaic technology	12	[19]
Valuation of projects for power generation with renewable energy: A comparative study based on real	12	[20]

regulatory options		
Entry into the electricity market: uncertainty, competition, and mothballing options	12	[21]
Assessment of domestic photovoltaic systems based on real options theory	12	[22]
Using real option analysis for highly uncertain technology investments: The case of wind energy technology	12	[23]
Wind power projects planning considering real options for the wind resource assessment	12	[24]
Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects	12	[8]
Real options approach to renewable energy investments in Mongolia	12	[25]
Real options valuation of fusion energy R&D programme	10	[26]
Using real option analysis to quantify ethanol policy impact on the firm's entry into and optimal operation of corn ethanol facilities	12	[27]
A real option model for renewable energy policy evaluation with application to solar PV power generation in China	12	[28]
The carbon market incremental payoff in renewable electricity generation projects in Brazil	12	[29]
Electricity and combined heat and power from municipal solid waste	12	[30]
Generation investment decision-making in emission trading environment with multiple uncertainties	8	[31]
A valuation of wind power projects in Germany using real regulatory options	12	[32]
Evaluation of new and renewable energy technologies in Korea using real options	10	[33]
A public policy aid for bioenergy investment: Case study of failed plants	12	[34]
Using a spark-spread valuation to investigate the impact of corn-gasoline correlation on ethanol plant valuation	10	[35]
Analysis of a power plant investment opportunity under a carbon neutral world	12	[36]
Real options analysis for renewable technologies in a GHG emissions trading environment	10	[37]
Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case	12	[38]
Time-dependent opportunities in energy business: A comparative study of locally available renewable and conventional fuels	12	[39]
Switching outputs in a bioenergy cogeneration project: A real options approach	12	[40]
Valuation of wind energy projects: A real options approach	12	[41]
Applying the real option approach on nuclear power project decision making	12	[42]
The value of operational flexibility by adding thermal to hydropower a real option approach	12	[43]
Assessment of offshore wind energy projects in Denmark. A comparative study with onshore projects based on regulatory real options	12	[44]
Uncertainty, Irreversibility, and Investment in Second-Generation Biofuels	12	[45]
Energy reserve trade optimization for wind generators using black and scholes options in small-size power systems	12	[46]
Renewable energy investment project evaluation model based on improved real option	12	[47]
Is now a good time for Iowa to invest in cellulosic biofuels? A real options approach considering construction lead times	12	[48]
Risk Analysis of Wind Energy Investments in Turkey	12	[50]
Risk neutral and risk averse approaches to multistage renewable investment planning under uncertainty	12	[51]
Distributed solar renewable generation: Option contracts with renewable energy credit uncertainty	10	[52]
Real option analysis for renewable energy investment under uncertainty	10	[53]
Evaluation of R&D investments in wind power in Korea using real option	12	[54]
A real options optimization model to meet availability requirements for offshore wind turbines	10	[55]
Real options valuation of a wind farm	10	[56]
Risk assessment of investment strategy in distributed energy system under uncertainty of fuel and electricity prices	12	[57]

---

Figura 4: Histograma de la calificación de artículos



*Fuente: Elaboración propia*

De la anterior Figura se puede concluir que la calificación más alta es 12 puntos con un total de 41 artículos y una participación del 80%, seguida por la de 10 puntos con 9 artículos y participación de 18%, lo que indica que la literatura seleccionada cumple con los criterios de calidad anteriormente propuestos dado que los artículos poseen una calificación mayor a la mitad es decir 6 puntos, solo hay un artículo con la calificación de 8 puntos.

## 4 DISCUSIÓN

En esta sección se da respuesta a las preguntas de investigación.

### 4.1 P1: ¿Cuáles son las tecnologías planteadas en los estudios ya publicados?

Para responder esta pregunta se preparó la Tabla 6, en la cual se presenta el conteo de artículos por tecnología utilizada.

*Tabla 9: Número de artículos por tecnología*

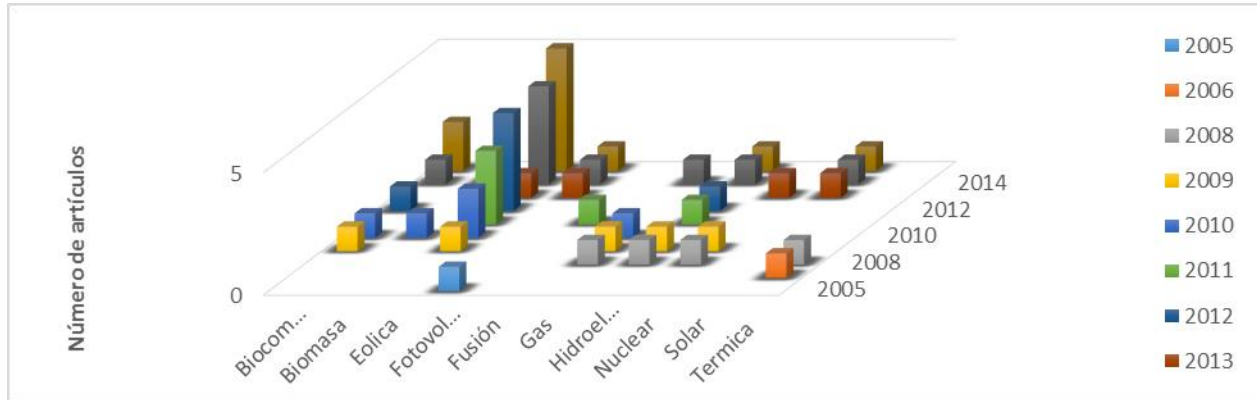
Tecnología	Número de Artículos	Referencia
Eólica	18	[13][11][14][17][20,23][24][31-32][41][44][47][49][50][52-55]
Biocombustible	9	[20][32][35][34-35][44][45][50][53]
Hidroeléctrica	6	[8][13][22][34][48][55]
Foto volcánica	6	[24][27][42][43][61][33]
Nuclear	5	[26][31][36][41][47]
Térmica	3	[21][26][48]
Solar	2	[23][56]
Turbinas Eólicas	1	[59]
Gas	1	[12]

Con respecto a la literatura se puede concluir que la tecnología más evaluada en proyectos de inversión con energías alternativas es la eólica, seguida de biocombustible o biomasa, esto es debido a que estas son atractivas globalmente y se han considerado ambientalmente sostenibles comparada con las energías fósiles. Otra razón es que la producción de los biocombustibles ayudan al desarrollo de la economía rural, tan como lo indica [53].

Por otro lado en [44] comparan el biocombustible a través de la producción del algodón con el gas natural, enfatizando que el gas natural posee mayor rentabilidad, aunque a mi opinión la extracción del gas natural no sea muy amigable con la corteza terrestre debido a la forma en que es extraído.

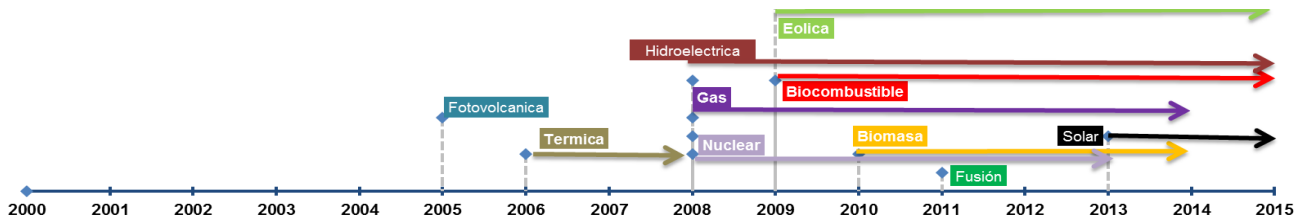
A continuación se ilustra la evolución de la tecnología.

Figura 5: Evolución de la tecnología.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Evolución de la tecnología.



Fuente: Elaboración propia

En el Figura 5 y 6 se observa la evolución de la tecnología a la que se aplica el método de opciones reales, la cual deja como conclusión que la energía eólica es la más investigada a través de los años con un total de 18 artículos en el periodo comprendido entre 2009-2015.

#### 4.2 P2: ¿Qué fuentes de incertidumbre son consideradas en los casos de estudio?

Para dar respuesta a esta pregunta se preparó la Tabla 7, en la cual se listan las incertidumbres consideradas en la literatura.



Tabla 10: Número de artículos por fuente de incertidumbre

Incetidumbre	Número de Artículos	Referencia
Precios de la electricidad	22	[8][7-8][11][18][21][20-21][31] [30-32][41][39-42][49][51][54] [56] [55-56]
Precio del Combustible	13	[12][14][15][18][23][36][38][40][39] [48][47-48][58]
Costos de inversión	5	[25][37][41][49][54]
Demanda de la electricidad	4	[21][24][26][56]
Energía eléctrica producida.	3	[25][37][49]
Índice de Precio al Consumidor.	3	[25][37][49]
Precio del carbón	3	[30][33][34]
Costo de la Energía Renovable	2	[15][33]
Tasas de interés	2	[35][43]
Precios futuros	2	[32][39]
Tasa de cambio	2	[43][60]
Cambio de régimen de subsidios	1	[16]
Mercado de energía	1	[17]
Costo de operación	1	[18]
Marco político y normativo	1	[19]
Incetidumbres ambientales	1	[15]
Carga de viento	1	[22]
Costo del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos debido a las emisiones de gases de invernadero, en el mercado comercial.	1	[27]
Precios de los permisos de CO2	1	[35]
Tasas de inflación.	1	[35]
Velocidad del viento	1	[29]
Costo de la energía no renovable	1	[33]
Precio de subsidio	1	[16]
Precio del petróleo	1	[35]
Precios históricos del maíz	1	[40]
Precio de ejercicio de la tecnología	1	[42]
Precio de cotización de mercado de las emisiones de gases de efecto invernadero	1	[37]
Radiación Solar anual	1	[43]
Precio de la electricidad a corto plazo.	1	[45]
Nivel del depósito de agua	1	[48]
Precio de la reserva de viento	1	[51]
Flujo de agua	1	[55]
Precio de la Energía Renovable	1	[56]
Flujo de caja esperado	1	[57]
Precio de mercado de la energía	1	[59]
Las condiciones meteorológicas	1	[59]
Producción anual de la electricidad	1	[60]
Precio de gas natural	1	[61]

Cabe notar que el precio de la electricidad es la incertidumbre más utilizada para la evaluación de opciones reales, esto debido a que estos precios presentan grandes volatilidades, están sujetos a regulaciones gubernamentales y fluctúan con la inflación de cada país.

El precio de la electricidad es seguido por el precio del combustible el cual es también muy volátil, pero hace una muy importante contribución a la hora de comparar energías alternativas con los combustibles fósiles. En estudios como el de [40] se encuentra como a través de escenarios se puede comparar la dinámica de los precios de la gasolina y el precio del maíz, este estudio trata del biocombustible como energía renovable.

El estudio [48] tiene como objetivo analizar el impacto en el valor de ser capaz de cambiar entre fuentes de tecnologías alternativas de generación de energía (hidro - térmica) con el fin de aprovechar los precios más altos cuando los niveles de agua se están agotando. Aquí se colecta los resultados del nivel del agua (hasta 2006) a través de la base de datos del regulador NVE, con la hipótesis: el valor potenciador de poseer y controlar las tecnologías de generación de manera que se genera relativamente más energía cuando los precios son más altos (y niveles de agua son bajos).

Esta incertidumbre se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$C_t^H = \beta_0 + \beta_1 WRL_t + \beta_2 \Delta WRL_t + \beta_3 \Delta MED_t + \varepsilon_t$$

Donde  $\Delta WRL$  denota el cambio del nivel del agua durante una semana y  $\Delta MED_t$  denota la diferencia entre la mediana del nivel del agua de la semana actual y el nivel del agua descrito por el NVE, la variable  $\varepsilon_t$  mide la desviación de la mediana del nivel del agua. Esta variable capta la situación si se trata de un año "húmedo" o "seco".

La anterior ecuación se resuelve a través de estadística descriptiva y correlaciones de Pearson. Los resultados indican una relación positiva significativa entre el nivel del agua y el forward spot spread, esto significa que a bajos niveles de agua el forward spot spread es negativo, y cuando el forward spot spread es alto el costo de generación de energía es significativo es aquí donde se hace interesante la oportunidad de cambiar de tecnología de generación de energía en orden de generar periodos de precios picos, asumiendo que el precio spot es mayor que el costo de la generación.

Por otro lado en [43] se desea implementar un sistema foto volcánico cuya una de sus incertidumbres es la radiación solar, esta posee distribución normal y es evaluada a través de la simulación Montecarlo con 1000 iteraciones. La radiación solar ocupa el 61% de la varianza del VPN mostrando así la importancia de la ubicación del sistema de energía foto volcánica.

Según lo anterior vale aclarar que para simulación Montecarlo es recomendable hacer 10.000 o más iteraciones ya que ayuda a la precisión del modelo.[62]

Otra incertidumbre que vale la pena nombrar es el costo de la inversión el cual se encuentra en el tercer lugar de la Tabla 7 con 5 artículos, esta es mencionada por [25] y su evaluación es a través

de un proceso estocástico con media reversaba con saltos, este proceso se puede interpretar como el resultado de añadir al valor medio de la variable a una variable aleatoria normal con varianza proporcional al intervalo en consideración, mientras se le agrega un proceso de Poisson.

La hipótesis de partida es que los costos de inversión son idénticos dentro de los países de la unión europea. De acuerdo a los datos históricos, se observó que desde 1986 (los primeros datos disponibles), los costes de inversión en este tipo de tecnología disminuyen hasta 2001.

### 4.3 P3: ¿Cuáles tipos de opciones reales se han usado en la literatura?

En este apartado se da solución a esta pregunta a través de la Tabla 8 donde se listan las opciones reales evaluadas en la literatura.

Tabla 11: Número de artículos por Opción

Opción	Número de Artículos	Referencia
Diferir	14	[7-8][16][23][22-23][30] [8][29][42] [44-45][53][55]
Expandir	9	[14][12-14][25][28- 29][37] [41]
Intercambio	7	[16-17][32][40][45][48] [51]
Invertir	5	[44][46][52][57][60]
Modularidad	4	[31][31][24][61]
Compuesta	2	[43][54]
Diferir/expandir	2	[15][20]
Abandonar/Continuar/Diferir	2	[58] [38]
Abandonar/Diferir	1	[47]
Esperar a implementar el mantenimiento	1	[59]
Invertir/Abandonar	1	[39]
Retirar	1	[26]

De la Tabla 7 se puede inferir que la opción real más utilizada es diferir, tal como se concluye en el trabajo de [8] en este se evalúa una inversión en planta hidroeléctrica, considerando como incertidumbre el precio de la electricidad; estos precios son tratados con el modelo GBM mencionado anteriormente, el valor de la opción es simulada a través de datos históricos. El país donde se presenta el caso de estudio es Noruega.

Otra de las opciones que más aporta estudios a la investigación es Intercambio con un total de 7 artículos de 51; uno de ellos es el estudiado por [45] donde intercambiar agrega un valor significativo al proyecto de residuos de biomasa, aquí la incertidumbre es el precio de la electricidad al corto plazo y usa como evaluación el proceso de reversión de la media con saltos.

Otro enfoque es el propuesto por [54] donde se consideran opciones compuestas para evaluar la inversión de un sistema eólico donde se hacen 200 simulaciones del valor presente neto con el fin de encontrar el valor de la opción, esta metodología basada en la simulación de Monte Carlo, que considera tanto los riesgos y las compensaciones asociadas a la inversión. El modelo se aplica a una inversión aerogenerador en Turquía con el fin de demostrar la aplicabilidad del modelo propuesto. Los resultados indican que el valor de la opción creado a través de las inversiones en energía eólica debido a las compensaciones gubernamentales es muy alta.

Por otro lado en [58] se estudió una evaluación de inversiones en investigación y desarrollo de plantas eólicas en Corea, aquí se presenta una decisión compuesta de continuar I&D, diferir I&D o abandonar I&D, esto si se presentan los siguientes escenarios:

- Si el precio del combustible continua creciendo y el costo de I&D de la energía eólica disminuye la decisión sería continuar con I&D
- Si los resultados de la I&D han sido positivos y el costo de la generación de la energía eólica es competitiva comparado con el combustible fósil, la decisión sería diferir
- Si se encuentra una razón para parar el desarrollo del proyecto la decisión sería abandonar.

El precio del combustible fósil es la incertidumbre estudiada aquí y su volatilidad es modelada a través del movimiento browniano geométrico. Estas opciones se evaluaron por medio de mallas binomiales.

Una opción que llama la atención es la formulada en [59] aquí se desea hallar la opción de compra de mantenimiento esto con el fin de optimizar la decisión del inversionista, dado que entre más bajo sea el costo del mantenimiento más alta la ganancia. La solución a esta opción se plantea a través de ecuaciones y programación dinámica. La tecnología propuesta en este estudio son las turbinas eólicas y a estas se le aplica el mantenimiento. Los autores de este estudio proponen un presupuesto para el mantenimiento de las turbinas y a partir de esto dan solución a las ecuaciones.

#### **4.4 P4: ¿Qué metodología de valoración se ha aplicado a las opciones reales en la literatura?**

Las opciones reales son planteadas en el año 1977 por Myers [63] debido al crecimiento de aplicación de opciones financieras en la valoración de proyectos reales, el cual concluyó que el valor real de la una compañía no solo depende del valor presente de las opciones reales la cuales se definieron en [2]; sino también del crecimiento del valor presente de las opciones reales futuras.

La metodología predominante arrojada por la investigación es la simulación Montecarlo el cual consiste en crear un modelo matemático del sistema que se desea analizar, identificando los inputs o variables aleatorias que determinan el comportamiento del sistema, en este estudio los inputs son generalmente el precio de la opción real. tal como se describe en [18] el cual usa la

simulación cuando los arboles binomiales no son viables. Según la información arrojada por la revisión sistemática estas simulaciones pueden tener más de 10.000 iteraciones, lo que hace dispendioso hacerlas manualmente e incluso en Excel, lo que conlleva a correrlas en software tales como: Matlab, R, @Risk [60], etc.

A continuación otros métodos de valoración:

- **Modelo de programación dinámica y curvas de aprendizaje:** este tiene capacidad de acomodar periodo tras periodo la evaluación de alternativas de inversión irreversibles en condiciones de incertidumbre, contando así con un análisis de opciones reales [12].
- **Modelo de árboles binomiales y mallas binomiales:** Una malla binomial es una técnica utilizada para la valoración de derivados financieros la cual muestra los diferentes caminos que toma el activo subyacente bajo incertidumbre en escenarios discretos, asumiendo que el activo subyacente sigue un proceso binomial multiplicativo. Una ventaja de estos modelos es la posibilidad de modelar múltiples opciones interrelacionadas y modelar de una forma práctica opciones de tipo americano; sin embargo, la precisión de este método es inferior que el modelo de ecuaciones diferenciales [7].

Por otro lado en [17] se derivó un proceso de mallas binomiales únicas que se aproximan a procesos continuos interrelacionados, para la evolución de los valores de proyectos y opciones (por ejemplo, la venta de un proyecto ya construido). Los pasos de esta aproximación para  $n$  proyectos son presentados progresivamente comenzando a partir de dos proyectos. En segundo lugar, se investiga el papel de interrelación en los valores de las opciones. Por último, se demuestra cómo las opciones que representan decisiones estratégicas pueden ser utilizadas en un proceso secuencial de toma de decisiones involucrando  $n$  proyectos interrelacionados.

- **Ecuaciones diferenciales:** Acorde con la literatura la ecuación utilizada en la metodología de evaluación de opciones reales es la de Bellman, la cual describe el comportamiento óptimo de una empresa que sostiene la opción de invertir en un proyecto, también se define como el rendimiento esperado de la oportunidad de inversión a través de un intervalo de tiempo.

En [50] se modelan cuatro ecuaciones diferenciales derivadas de Bellman, con el precio de la gasolina como incertidumbre en cual consiste en un proceso estocástico modelado con Movimiento Browniano Geométrico. Este modelo se resuelve a través del software Matlab.

- **Escenarios:** Modelo de comparación del VPN con la producción de la energía. En [35], se compararon dos escenarios de producción de energía: (I), sólo se produce electricidad y (II) producción del calor y el poder combinado. Se hace hincapié en que una infraestructura de calefacción urbana no está disponible en Atenas, pero el calor y el poder combinado serán investigados con el fin de revelar sus potenciales ventajas sobre la producción de electricidad.

- **Modelo NEWAVE aplicado a escenarios:** El modelo NEWAVE es un modelo de planeación de la operación de los sistemas interconectados en Brasil a largo plazo o mediano. En [34] este modelo que calcula las asignaciones óptimas de los recursos hídricos y térmicos dentro del sistema que reduzca al mínimo el costo total operativo proyectado para cada mes del horizonte de planificación. Para representar a la estocasticidad de las entradas, el modelo NEWAVE utiliza un gran número de escenarios futuros de flujo de entrada de las centrales hidroeléctricas.
- **Modelo de distribución Gaussiana:** El modelo propuesto en [51] integra las restricciones de seguridad del sistema eléctrico. En la solución óptima, el multiplicador lambda asociado a las ecuaciones de balance de potencia real proporciona primas de opciones y precios de ejercicio, esta distribución se utiliza para modelar los errores en la predicción de energía eólica a corto plazo.
- **Modelo matemático para elegir una inversión estratégica en la industria fotovoltaica:** este modelo permite manejar la incertidumbre de la demanda que no se ha tenido en cuenta usando el valor presente neto (VPN) como una herramienta para apoyar las decisiones. Por otra parte, se muestra cómo este modelo de evaluación es capaz de reducir el riesgo de una inversión estratégica, si se compara con el VPN, y señalar los factores generadores de valores ocultos en una decisión de gestión.[24].
- **Opción Real Difusa:** Modelo que consiste en evaluar la eficacia económica de un proyecto de inversión de energía eólica altamente incierto a través de números difusos.

Los modelos de flujo de efectivo aplicados en problemas de toma de decisiones económicas relacionadas con la evaluación del proyecto de inversión siempre involucra un elemento de incertidumbre, por lo cual los flujos de caja esperados no se pueden caracterizar por un solo número, dado a esto se utilizan los números difusos triangulares, o *TFN*, estos son usados para estimar los flujos de caja esperados.[57]

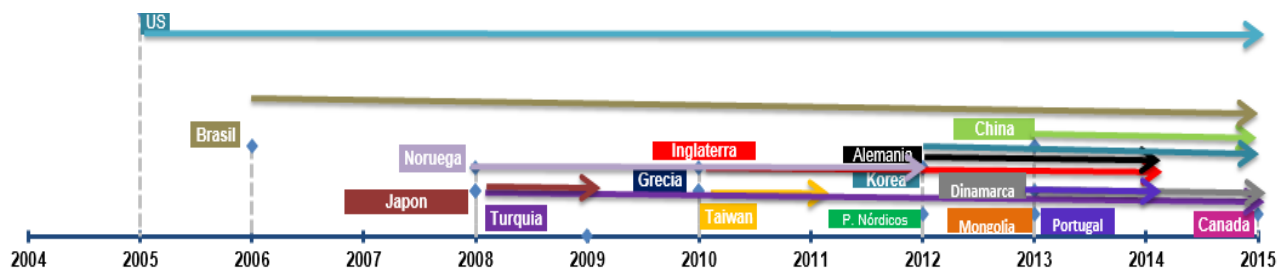
#### 4.5 P5: ¿En qué países se ha aplicado el método de opciones reales en la literatura?

Esta pregunta se responde a continuación en la Tabla 9, aquí se incluyen las referencias bibliográficas y se listan los países donde se aplican las opciones reales en la literatura.

Tabla 12: Número de artículos por país

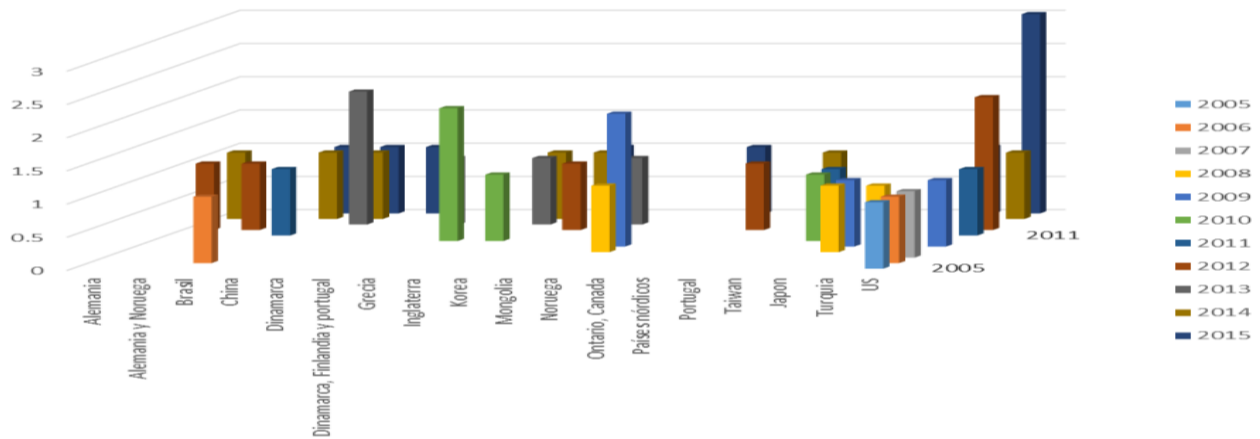
Pais	Número de Artículos	Referencia
US	11	[15][17][20][24][29][32][39][50][48][51][59]
Brasil	4	[21][34][45][55]
China	4	[23][33][47][52]
Corea	3	[38][43][58]
Inglaterra	2	[18][27][46]
Noruega	3	[13][41][48]
Alemania	2	[19][37]
Grecia	2	[35][44]
Taiwan	2	[14][28]
Japon	2	[26][61]
Turquia	2	[12][54]
Alemania y Noruega	1	[22]
Dinamarca	1	[49]
Dinamarca, Finlandia y Portugal	1	[25]
Mongolia	1	[51]
Ontario, Canada	1	[30]
Países nórdicos	1	[16]
Portugal	1	[8]

Figura 7: Evolución por país



Fuente: Elaboración propia

Figura 8: Evolución de artículos por país



Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 8 y Figura 7 se puede concluir que el país donde se ha realizado más estudios sobre opciones reales en proyectos de inversión con energías alternativas es Estados Unidos, con un total de 11 artículos en el periodo comprendido entre 2005-2015. De acuerdo con [64] Estados Unidos es el segundo país que invierte más en el desarrollo de energías renovables,

Según [64] el país que invierte más en energías renovables es China, el cual aparece en el segundo lugar de esta investigación compartiendo este con Brasil, China es también potencia mundial además de tener la necesidad de cambiar las energías fósiles por energías alternativas dada a la contaminación que presenta ciudades como Hong Kong.

Cabe notar que se encontraron artículos los cuales son apoyados por empresas públicas y privadas tal como [56] el cual la investigación es apoyada económicamente por General Motors en Estados Unidos. La tecnología aquí tratada es la energía solar, cuya incertidumbre es el precio de la electricidad, en el estudio se usa mallas binomiales con el fin de pronosticar el precio de la electricidad.

Por otro lado, se puede observar en el Figura 8 la evolución de artículos por países donde se estudió opciones reales en energía renovable dando como conclusión que entre los años 2012 - 2015, Estados Unidos publica más artículos con una participación de 6 artículos. También se puede concluir de esta Figura que los años en que más se publica la temática de opciones reales en proyectos de inversión en energías alternativas son el 2015 y 2014 con una participación del 18% cada uno.



## 5 CONCLUSIONES

Los proyectos de inversión en generación de energía tienen particularidades propias del mercado, las cuales implican que sean valoradas según su complejidad, como por ejemplo estos proyectos principalmente tienen las siguientes características: el costo de la inversión inicial es alto, tienen alto riesgo e incertidumbre, esto debido a la variabilidad de las fuentes naturales tales como el clima, y cambios en los esquemas además que sus curvas de aprendizajes son bastante empinadas, estos proyectos también se ven afectados por los precios de los combustibles fósiles, los cuales ayudan a la generación de los precios de la electricidad; por todo lo dicho anteriormente la metodología de las opciones reales muestra ser la solución para la evaluación de estos proyectos, dejando atrás a los métodos que no consideraban las particularidades del mercado.

En este documento se encuentra los resultados arrojados por la revisión sistemática de la literatura, esta revisión fue realizada con el fin de determinar el estado actual de los avances recientes en el uso de opciones reales en la evaluación de proyectos de generación de energía con fuentes alternativas.

Los resultados arrojados por la revisión sistemática de la literatura fueron: 51 artículos comprendidos entre los años 2005 a 2015, teniendo un mayor auge a partir de los años 2012 a 2015, esto debido a que el calentamiento global se ha hecho más notorio, y cada vez los recursos fósiles se hacen más escasos, además de ser no renovables. Potencias mundiales como EEUU y China, han invertido gran capital en promover la implementación de energías alternativas, a través de apoyos económicos para investigaciones en este tema. En esta revisión también se encontraron artículos de años anteriores a 2005 pero estos fueron excluidos de la investigación debido a que algunos trataban de opciones reales aplicadas a combustibles fósiles.

Por otra parte la metodología de evaluación de la opción real más utilizada es la simulación, siendo Monte Carlo la más usada. En la literatura se encuentra que algunas de las simulaciones se hacen en programas como R y @risk, acorde con los literatura analizada para estas simulaciones es recomendable hacer 10.000 iteraciones o más, con el fin de hallar un resultado más preciso.

Con respecto a las tecnologías de aplicación utilizadas, en el análisis de proyectos de inversión, las opciones reales tienen gran preferencia por las energías renovables, las cuales como su nombre lo dicen sus recursos son inagotables, en este grupo se encuentran: la energía eólica, solar y los biocombustibles.

El resultado de muchos estudios sirve para desarrollar políticas energéticas y de regulación del CO<sub>2</sub>, en estos estudios se utilizan métodos tradicionales tal como escenarios o mallas binomiales, aquí se comparan las tecnologías convencionales (generación de energía a través de combustibles fósiles) con energías alternativas (eólica, solar, biocombustible, hidroeléctrica, foto volcánica, etc)

Según la información revisada las incertidumbres que afectan los proyectos de inversión en energía alternativa se clasifican en externa e interna, las incertidumbres externas son las afectan a varios tipos de proyectos, (ej: Precio de combustible, precio de la electricidad) en cuanto las internas afectan a un proyecto en específico, (ej: nivel de agua, velocidad del viento).

La práctica más usada en los estudios para la evaluación de la volatilidad de los precios de la electricidad y el combustible, es el movimiento browniano geométrico, el cual se define como un proceso estocástico aleatorio que describe el comportamiento de ciertas variables aleatorias a medida que se desplazan en el tiempo

Cabe destacar que la mayoría de estudios concluyen que las opciones reales aumenta la rentabilidad de los proyectos de inversión en energías alternativas y reduce los costos.

Para futuras investigaciones se recomienda hacer un caso de estudio para Colombia donde se pueda comparar los pros y contra de cada energía alternativa, esto es necesario ya que en los últimos años ha surgido la incógnita de cambiar de una fuente de energía fósil a fuente de energía que se inagotable.

## REFERENCIAS

- [1] J. H. Sierra G, “OPCIONES REALES PARA LAS DECISIONES DE INVERSIÓN: ASPECTOS INTRODUCTIVOS,” 1999.
- [2] Black Fischer and Scholes Myron, “The Pricing of Options and Corporate Liabilities,” May-1973. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/discover/10.2307/1831029?uid=3737808&uid=2&uid=4&sid=21101948663277>.
- [3] J. E. C. Ocana, “Metodos alternativos de evaluacion de proyectos: opciones reales.” 2004.
- [4] E. a. Martínez Ceseña, J. Mutale, and F. Rivas-Dávalos, “Real options theory applied to electricity generation projects: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 573–581, Mar. 2013.
- [5] A. M. Ñ, “Valuation for renewable energy : A comparative review,” vol. 12, pp. 2422–2437, 2008.
- [6] E. A. Martínez Ceseña, J. Mutale, and F. Rivas-Dávalos, “Real options theory applied to electricity generation projects: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 573–581, Mar. 2013.
- [7] F. Isaza Cuervo and S. Botero Botero, “Aplicación de las opciones reales en la toma de decisiones en los mercados de electricidad,” *Estud. Gerenciales*, vol. 30, no. 133, pp. 397–407, Oct. 2014.
- [8] L. Santos, I. Soares, C. Mendes, and P. Ferreira, “Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 588–594, Aug. 2014.
- [9] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, “Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, Jan. 2009.
- [10] B. Kitchenham, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering,” 2007.
- [11] B. Kitchenham, “Procedures for performing systematic reviews,” *Keele, UK, Keele Univ.*, vol. 33, no. TR/SE-0401, p. 28, 2004.
- [12] G. Kumbaroğlu, R. Madlener, and M. Demirel, “A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies,” vol. 30, pp. 1882–1908, 2008.
- [13] T. Bøckman, S. Fleten, E. Juliussen, and I. Revdal, “INVESTMENT TIMING AND OPTIMAL CAPACITY CHOICE FOR SMALL HYDROPOWER PROJECTS,” *Eur. J. Oper. Res.*, no. 7491, pp. 1–21.
- [14] S. Lee and L. Shih, “Renewable energy policy evaluation using real option model — The case of Taiwan,” *Energy Econ.*, vol. 32, pp. S67–S78, 2010.

- [15] A. S. Siddiqui, C. Marnay, and R. H. Wiser, “Real options valuation of US federal renewable energy research, development, demonstration, and deployment,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 1, pp. 265–279, Jan. 2007.
- [16] T. K. Boomsma, N. Meade, and S.-E. Fleten, “Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 220, no. 1, pp. 225–237, Jul. 2012.
- [17] C.-H. Wang and K. J. Min, “Electric Power Generation Planning for Interrelated Projects: A Real Options Approach,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 53, no. 2, 2006.
- [18] A. Siddiqui and S. Fleten, “How to proceed with competing alternative energy technologies : A real options analysis ☆,” *Energy Econ.*, vol. 32, no. 4, pp. 817–830, 2010.
- [19] W. H. Reuter, J. Szolgayová, S. Fuss, and M. Obersteiner, “Renewable energy investment: Policy and market impacts,” *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 249–254, Sep. 2012.
- [20] T. M. Schmit, J. Luo, and L. W. Tauer, “Ethanol plant investment using net present value and real options analyses,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 10, pp. 1442–1451, 2009.
- [21] J. de M. Marreco and L. G. T. Carpio, “Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 18, pp. 3749–3756, Dec. 2006.
- [22] W. H. Reuter, S. Fuss, J. Szolgayová, and M. Obersteiner, “Investment in wind power and pumped storage in a real options model,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2242–2248, May 2012.
- [23] B. Lin and P. K. Wesseh, “Valuing Chinese feed-in tariffs program for solar power generation: A real options analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 474–482, Dec. 2013.
- [24] A. Calabrese, M. Gastaldi, and N. L. Ghiron, “Real option’s model to evaluate infrastructure flexibility: an application to photovoltaic technology,” *Int. J. Technol. Manag.*, vol. 29, no. 1/2, p. 173, 2005.
- [25] M. Monjas-Barroso and J. Balibrea-Iniesta, “Valuation of projects for power generation with renewable energy: A comparative study based on real regulatory options,” *Energy Policy*, vol. 55, pp. 335–352, Apr. 2013.
- [26] R. Takashima, M. Goto, H. Kimura, and H. Madarame, “Entry into the electricity market: Uncertainty, competition, and mothballing options,” *Energy Econ.*, vol. 30, no. 4, pp. 1809–1830, Jul. 2008.
- [27] E. A. Martinez-cesena, B. Azzopardi, and J. Mutale, “Assessment of domestic photovoltaic systems based on real options theory,” *IEEE PowerTech. Norw.*, 2012.
- [28] S.-C. Lee, “Using real option analysis for highly uncertain technology investments: The case of wind energy technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4443–4450, Dec. 2011.
- [29] E. A. Martinez-Cesena and J. Mutale, “Wind Power Projects Planning Considering Real

- Options for the Wind Resource Assessment,” *IEEE Trans. Sustain. ENERGY*, vol. 3, no. 1, 2012.
- [30] N. Detert and K. Kotani, “Real options approach to renewable energy investments in Mongolia,” *Energy Policy*, Jan. 2013.
- [31] D. Bednyagin and E. Gnansounou, “Real options valuation of fusion energy R & D programme,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 1, pp. 116–130, 2011.
- [32] C. Maxwell and M. Davison, “Using real option analysis to quantify ethanol policy impact on the firm’s entry into and optimal operation of corn ethanol facilities,” *Energy Econ.*, vol. 42, pp. 140–151, Mar. 2014.
- [33] M. Zhang, D. Zhou, and P. Zhou, “A real option model for renewable energy policy evaluation with application to solar PV power generation in China,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 944–955, Dec. 2014.
- [34] F. R. S. Batista, A. C. Geber De Melo, J. P. Teixeira, and T. K. N. Baidya, “The carbon market incremental payoff in renewable electricity generation projects in Brazil: A real options approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2011.
- [35] A. Tolis, A. Rentizelas, K. Aravossis, and I. Tatsiopoulos, “Electricity and combined heat and power from municipal solid waste; theoretically optimal investment decision time and emissions trading implications.,” *Waste Manag. Res.*, vol. 28, no. 11, pp. 985–95, Nov. 2010.
- [36] B. Xun, F. Wen, X. Li, A. Wen, and C. Fu, “Generation investment decision-making in emission trading environment with multiple uncertainties,” *Dianli Xitong Zidonghua/Automation Electr. Power Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 51–56, 2014.
- [37] M. M. Barroso and J. B. Iniesta, “A valuation of wind power projects in Germany using real regulatory options,” *Energy*, vol. 77, pp. 422–433, Dec. 2014.
- [38] Y.-S. Jang, D.-J. Lee, and H.-S. Oh, “Evaluation of new and renewable energy technologies in Korea using real options.”
- [39] A. O. Gonzalez, B. Karali, and M. E. Wetzstein, “A public policy aid for bioenergy investment: Case study of failed plants,” *Energy Policy*, vol. 51, pp. 465–473, Dec. 2012.
- [40] N. Kirby and M. Davison, “Using a spark-spread valuation to investigate the impact of corn-gasoline correlation on ethanol plant valuation,” *Energy Econ.*, vol. 32, no. 6, pp. 1221–1227, Nov. 2010.
- [41] T. Yun and R. D. Baker, “Analysis of a power plant investment opportunity under a carbon neutral world,” *Invest. Manag. Financ. Innov.*, 2009.
- [42] J. Sarkis and M. Tamarkin, “Real options analysis for renewable energy technologies in a GHG emissions trading environment.”
- [43] C. Jeon, J. Lee, and J. Shin, “Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 33–43, Mar. 2015.
- [44] A. I. Tolis, A. a. Rentizelas, and I. P. Tatsiopoulos, “Time-dependent opportunities in

- energy business: A comparative study of locally available renewable and conventional fuels,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 384–393, Jan. 2010.
- [45] D. L. de Oliveira, L. E. Brandao, R. Igrejas, and L. L. Gomes, “Switching outputs in a bioenergy cogeneration project: A real options approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 74–82, Aug. 2014.
- [46] L. M. Abadie and J. M. Chamorro, “Valuation of wind energy projects: A real options approach,” *Energies*, 2014.
- [47] H. Shi and H. Song, “Applying the Real Option Approach on Nuclear Power Project Decision Making,” *Energy Procedia*, vol. 39, pp. 193–198, 2013.
- [48] F. Kjaerland and B. Larsen, “The Value of Operational Flexibility – Adding Thermal to Hydro The value of operational flexibility by adding thermal to hydropower – a real option approach.”
- [49] J. Balibrea Iniesta and M. Monjas Barroso, “Assessment of Offshore Wind Energy Projects in Denmark. A Comparative Study With Onshore Projects Based on Regulatory Real Options.”
- [50] T. McCarty and J. Sesmero, “Uncertainty, Irreversibility, and Investment in Second-Generation Biofuels,” *BioEnergy Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 675–687, Nov. 2014.
- [51] Reza Ghaffari and Bala Venkatesh, “Energy Reserve Trade Optimization for Wind Generators Using Black and Scholes Options in Small-Size Power Systems.”
- [52] C.-Y. Dai, Y.-X. Wang, D. Li, and Y.-L. Zhou, “Renewable Energy Investment Project Evaluation Model Based on Improved Real Option.”
- [53] Y. Li, C.-L. Tseng, and G. Hu, “Is now a good time for Iowa to invest in cellulosic biofuels? A real options approach considering construction lead times,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 167, pp. 97–107, Sep. 2015.
- [54] S. Ç. Onar and T. N. Kılavuz, “Risk Analysis of Wind Energy Investments in Turkey,” *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 1230–1245, 2015.
- [55] S. Bruno, S. Ahmed, A. Shapiro, and A. Street, “Risk neutral and risk averse approaches to multistage renewable investment planning under uncertainty,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 250, no. 3, pp. 979–989, Oct. 2015.
- [56] Y. Zeng, D. Klabjan, and J. Arinez, “Distributed solar renewable generation: Option contracts with renewable energy credit uncertainty,” *Energy Econ.*, vol. 48, pp. 295–305, Mar. 2015.
- [57] J.-N. Sheen, “Real Option Analysis for Renewable Energy Investment Under Uncertainty,” *J.-N. Sheen (&)*, no. Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [58] K.-T. Kim, D.-J. Lee, and S.-J. Park, “Evaluation of R&D investments in wind power in Korea using real option,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 335–347, Dec. 2014.
- [59] G. Haddad, P. Sandborn, and M. Pecht, “A REAL OPTIONS OPTIMIZATION MODEL TO MEET AVAILABILITY REQUIREMENTS FOR OFFSHORE WIND TURBINES.”
- [60] M. Méndez, A. Goyanes, and P. Lamothe, “Real Options Valuation of a Wind Farm,” *9th*

*Annu. real options Int. Conf. Port. Spain*, no. February, 2009.

- [61] W. Ariki, H. Asano, E. Koda, and S. Bando, “Risk Assessment of Investment Strategy in Distributed Energy System under Uncertainty of Fuel and Electricity Prices,” *IEEJ Trans. Power Energy*, vol. 129, no. 12, pp. 1486–1493, 2009.
- [62] I. Humberto Barreto, DePauw University and I. Frank Howland, Wabash College, *Introductory Econometrics Using Monte Carlo Simulation with Microsoft Excel*. .
- [63] S. C. Myers, “Determinants of corporate borrowing,” *J. financ. econ.*, vol. 5, no. 2, pp. 147–175, 1977.
- [64] UNEP Frankfurt School of Finance and Management and Bloomberg New Energy, “Global Trends in Renewable Energy,” p. 84, 2016.