



## **Metodología para la valoración de proyectos de generación eléctrica en Colombia vía opciones reales**

---

### **Autor:**

Simón Pérez Arango

Código: 201027000101

### **Tutores:**

Freddy Marín Sánchez (Universidad EAFIT)

Gabriel Vizcaíno Sánchez (Celsia S.A. E.S.P)

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias Matemáticas

Medellín

Junio de 2015

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología alternativa de valoración financiera vía opciones reales para evaluar proyectos de generación de energía eléctrica en Colombia. Siendo motivado por la falencia encontrada en los métodos tradicionales, como el flujo de caja descontado, para asignar valor a ciertas flexibilidades propias de los proyectos de generación. La metodología presentada está basada en simulaciones de Monte Carlo y parte de un modelo estocástico de volatilidad condicionada propuesto para el precio de bolsa del Mercado de Energía Mayorista (MEM). Se cuantificó el valor adicional que ofrece la rápida rampa de arranque como flexibilidad operativa de los motores reciprocantes, la cual incrementa el valor presente neto de esta tecnología en 26% con respecto al valor estimado vía flujo de caja convencional.

## Tabla de contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Revisión del estado del arte.....</b>	<b>7</b>
1.1. Valoración por flujo de caja descontado.....	7
1.2. Valoración relativa .....	8
1.3. Valoración contingente .....	9
<b>2. Definición metodología .....</b>	<b>11</b>
2.1. Caracterización flexibilidades.....	11
2.2. Descripción de la metodología.....	12
2.3. Modelo estocástico del precio en bolsa .....	13
2.4. Definición del costo variable .....	19
2.5. Implementación de la metodología de valoración de flexibilidades.....	21
<b>3. Resultados.....</b>	<b>23</b>
3.1. Planteamiento de experimentos.....	23
3.2. Resultados .....	25
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>30</b>
<b>5. Trabajo futuro .....</b>	<b>31</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>32</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Diagrama de rentabilidad horario para una planta de generación.....	12
<b>Figura 2.</b> Ejemplo del momento de ejercicio de la opción .....	13
<b>Figura 3.</b> Precio en bolsa de la energía, resolución diaria. ....	14
<b>Figura 4.</b> Transformación de la serie Precio en bolsa, con resolución diaria. ....	15
<b>Figura 5.</b> Desviación estándar mensual Precio en bolsa.....	16
<b>Figura 6.</b> Descripción de los posibles estados en $t + 1$ y condiciones de transiciones .....	20
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	21
<b>Figura 8.</b> Estimación del precio mensual de la electricidad utilizado para la valoración .....	24
<b>Figura 9.</b> Ejemplo de simulación del precio de bolsa diario para el 2015.....	25
<b>Figura 10.</b> Comparación de generaciones a partir de ambos métodos de valoración (A). ....	26
<b>Figura 11.</b> Histograma del valor presente neto del proyecto A.....	27
<b>Figura 12.</b> Comparación de generaciones a partir de ambas metodologías de valoración (C). ....	28

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Evidencia de la sensibilidad del valor presente al cambio de tasa de descuento .....	8
<b>Tabla 2.</b> Estadística descriptiva Precio en bolsa .....	15
<b>Tabla 3.</b> Valor $p$ de la prueba de hipótesis de igualdad de varianzas.....	17
<b>Tabla 4.</b> Estimación de parámetros por máxima verosimilitud .....	18
<b>Tabla 5.</b> Descripción de los bloques de precios establecidos .....	18
<b>Tabla 6.</b> Factores de multiplicación del precio en bolsa por bloque respecto a la media diaria.....	19
<b>Tabla 7.</b> Ejemplo del cálculo de la eficiencia según el estado de la planta.....	20
<b>Tabla 8.</b> Descripción de proyectos de generación a valorar. ....	23
<b>Tabla 9.</b> Rampa de arranque en eficiencia y carga para los proyectos definidos.....	23
<b>Tabla 10.</b> Costo de combustible [USD/MBTU] para los proyectos planteados .....	24
<b>Tabla 11.</b> Comparación de resultados de la valoración del proyecto A (Mill. COP de 2014). ....	26
<b>Tabla 12.</b> Comparación de resultados de la valoración del proyecto B (Mill. COP de 2014). ....	27
<b>Tabla 13.</b> Comparación de resultados de la valoración del proyecto C (Mill. COP de 2014). ....	28
<b>Tabla 14.</b> Comparación de resultados de la valoración del proyecto D (Mill. COP de 2014). ....	29

## Introducción

Las empresas de generación de energía eléctrica con el objetivo de no perder participación en el mercado y expandir su capacidad de atención a la demanda tienen entre sus funciones analizar nuevos proyectos de generación de energía eléctrica. Dentro de la fase de evaluación de proyectos, una de las actividades más importantes es la valoración, a partir de la cual se descartan aquellos proyectos que no agreguen valor a la compañía.

La técnica de valoración más utilizada, llamada “Flujos de Caja Descontados” (DCF por sus siglas en inglés), es empleada de manera generalizada para valorar distintos tipos de inversiones en diferentes sectores incluido el sector eléctrico. Como su nombre lo indica, esta técnica determina el valor actual de un proyecto descontando los flujos de caja futuros a una tasa que refleja el costo del capital del inversionista, incorporando su riesgo asociado. El tradicional método DCF, a pesar de su amplia utilización y facilidad de implementación, no es el más adecuado para la valoración de proyectos de generación en el sector eléctrico, pues tiene ciertas deficiencias. La principal deficiencia recae en la forma de incorporación de la incertidumbre asociada al negocio en la valoración y en la dificultad de asignación de valor a ciertas características particulares presentes en algunos proyectos que deberían agregar valor. Por ejemplo, una planta de generación que ofrece la alternativa de generar con dos combustibles diferentes, un proyecto de generación que tiene la posibilidad de expandirse al cabo de cierto tiempo o una planta que debido a la tecnología implementada presenta flexibilidades que le ofrecen una ventaja competitiva en la operación frente a otros proyectos, entre otras posibles alternativas.

El sector de generación de energía eléctrica tiene ciertas características que hacen que el flujo de caja descontado tradicional no sea la técnica más adecuada para valorar proyectos dentro del mismo. El tradicional método DCF es una técnica que incorpora la incertidumbre de los eventos a futuros dentro de la tasa de descuento o en una combinación de posibles escenarios arbitrarios. Este enfoque simplifica significativamente las condiciones inciertas y fluctuantes en las que se encuentra sumergido el sector eléctrico, las cuales se ven reflejadas en la alta volatilidad del precio de la energía ocasionada por diferentes factores como los fenómenos climáticos, la disponibilidad de recursos energéticos primarios, las estrategias comerciales de los agentes, entre otros.

La incertidumbre, además de generar riesgo, crea oportunidades que deben ser consideradas, por tanto, aquellas características particulares que la técnica de flujos de caja descontados no logra capturar, se deben analizar empleando otras metodologías de valoración que sean más coherentes con la naturaleza de las inversiones valoradas. Se propone entonces la valoración de proyectos de generación eléctrica vía opciones reales. Esta técnica aplica el enfoque de opciones financieras a la gestión de activos reales, buscando asignar valor a las posibles variantes o alternativas (opciones) que presentan los proyectos.

En este trabajo se implementa una metodología de valoración alterna para proyectos de generación eléctrica en Colombia, utilizando el enfoque de opciones reales. Dicha metodología será puesta a prueba mediante la valoración de diferentes alternativas de inversión.

Adicionalmente, el presente trabajo está enfocado en proveer una alternativa metodológica de valoración para realizar el análisis de oportunidades de inversión en proyectos de generación, con el fin de realizar una valoración más ajustada a la realidad del negocio y del sector, aportando de esta forma a la toma de decisiones de la compañía.

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: (i) en el primer capítulo se hace un repaso de los tres principales métodos de valoración y una revisión de literatura disponible en el método de opciones reales; (ii) en el segundo capítulo, se presenta la descripción de la metodología propuesta; (iii) en el tercer capítulo se presentan los resultados de la valoración aplicada a diferentes proyectos de generación. Finalmente se presentan (iv) las conclusiones y (v) el trabajo futuro.

## **1. Revisión del estado del arte**

La valoración de activos representa un eje fundamental en la teoría financiera moderna, por tanto ésta debe ser realizada con la mayor rigurosidad posible, utilizando el método adecuado dependiendo del tipo de activo y evitando incluir en ella las percepciones subjetivas del evaluador. En la práctica se utilizan un amplio rango de herramientas para valorar activos, incluidos proyectos de inversión, las cuales pueden ser en términos generales clasificadas en tres tipos (Damodaran, 2012): (i) el flujo de caja descontado, que valora un activo en función del valor presente de los flujos de caja esperados en el futuro; (ii) la valoración relativa, que estima el valor de un activo a partir de activos de características similares valorados en el mercado; y por último, (iii) la valoración contingente, que es la metodología con mayor desarrollo en la actualidad, consiste y se basa en asignar valor según los flujos de caja contingentes que dependen de la ocurrencia de ciertos eventos.

Pueden presentarse diferencias significativas en la valoración según el tipo de enfoque implementado, por tal motivo es importante identificar adecuadamente el tipo de método necesario para valorar cada activo. A continuación se describen brevemente los diferentes métodos mencionados.

### **1.1. Valoración por flujo de caja descontado**

La valoración por DCF pretende estimar el valor intrínseco de un activo y es considerada la base sobre la cual todas las demás valoraciones se encuentran desarrolladas (Damodaran, 2012). Su idea general consiste en determinar el valor actual de un activo a partir del valor presente de los flujos de caja que se espera éste genere en el futuro, descontados a una tasa de descuento. La tasa de descuento incorpora la percepción de riesgo del evaluador y la incertidumbre asociada al activo, puntualmente a la posibilidad de no generar los flujos de caja esperados. Esta tasa será mayor para activos riesgosos y cercana a la tasa libre de riesgo para activos más seguros.

Actualmente se pueden encontrar gran diversidad de modelos de flujo de caja implementados para diferentes propósitos. Por ejemplo, el valor de una empresa se puede obtener al descontar los flujos de caja esperados (remanentes, luego de cumplir con los costos operacionales, reinversión, impuestos, intereses de la deuda, entre otros gastos) a una tasa llamada promedio ponderado del costo del capital (WACC por sus siglas en inglés), que representa el costo de los diferentes componentes de financiamiento usados por la firma ponderados por su valor dentro de la inversión (i.e. deuda y patrimonio). Por otro lado, esta misma empresa se puede valorar por medio del valor presente ajustado (APV por sus siglas en inglés), que consiste en valorar la empresa suponiendo que está financiada únicamente por patrimonio propio, luego se considera el valor presente (agregado o sustraído) por concepto de deudas e impuestos. Este enfoque permite descontar a diferentes tasas diferentes flujos de caja.

El modelo de flujo de caja convencional valora un activo calculando el valor de presente de todos los flujos de caja esperados descontados a una tasa apropiada. En los modelos de Retorno Excedente se considera que generan valor únicamente aquellos flujos en exceso fuera del retorno exigido por el inversionista. Por tanto, el valor del activo está dado por la cantidad invertida más el

valor presente de los flujos de caja excedentes. El valor resultante debe ser igual al valor estimado por flujo de caja convencional.

La valoración por flujo de caja descontado es altamente sensible a la tasa de descuento elegida. En la Tabla 1 se muestra a manera de ejemplo que para ciertos flujos constantes una pequeña variación en la tasa de descuento ocasiona grandes cambios en el valor presente neto de la inversión.

**Tabla 1.** Evidencia de la sensibilidad del valor presente al cambio de tasa de descuento

<b>Año</b>	<b>Flujo de efectivo</b>	<b>Tasa de descuento</b>	<b>Valor presente neto</b>
<b>0</b>	-\$ 1,000,000.00	<b>8%</b>	\$ 79,854.20
<b>1</b>	\$ 100,000.00	<b>9%</b>	\$ 38,896.51
<b>2</b>	\$ 100,000.00	<b>10%</b>	\$ 0.00
<b>3</b>	\$ 100,000.00	<b>11%</b>	-\$ 36,958.97
<b>4</b>	\$ 100,000.00	<b>12%</b>	-\$ 72,095.52
<b>5</b>	\$ 1,100,000.00	<b>13%</b>	-\$ 105,516.94

Según autores como Luehrman (1997) la elección de una tasa de descuento inapropiada es la principal causa de valoraciones erráticas. El conceso en el mundo financiero en cuanto a la tasa de descuento utilizada para la valoración de activos es el WACC, que representa el costo ponderado del capital. El retorno del patrimonio suele calcularse a partir del modelo de valoración de activos financieros (CAPM por sus siglas en inglés), propuesto por Sharpe (1964). Con esta metodología se pretende estimar el retorno necesario para lograr cubrir todas las obligaciones del capital a partir de la rentabilidad media del mercado, la tasa libre de riesgo y el beta del activo, el cual representa la correlación entre los retornos históricos del sector en que opera el activo y la rentabilidad media del mercado.

El modelo DCF es el método más sencillo y útil de aplicar para valorar activos con flujos de caja predecibles con cierto grado de certeza y con un referente del riesgo asociado para calcular las tasas de descuento asociadas. Mientras más alejado se esté de este contexto más imprecisa será la estimación del valor del activo (Benninga, 2008).

## **1.2. Valoración relativa**

Gran parte de las valoraciones de activos se realizan por medio del modelo DCF, sin embargo, el método de valoración más utilizado es el de valoración relativa. Este es aplicado para la valoración de cualquier tipo de bien, desde la compra de una bicicleta, una casa, o un carro, hasta activos más complejos como compañías. El valor de estos activos puede ser estimado indirectamente a partir del valor de activos similares valorados en el mercado (Fernández, 2008).

Para la valoración se utiliza el concepto de múltiplos. Un múltiplo representa la razón entre el valor del activo similar y alguna característica propia del activo, por ejemplo ingresos, utilidades, flujos de caja, ventas, entre otros. La valoración relativa se puede realizar con dos enfoques: primero, la comparación cruzada donde se compara el activo con otro activo con características

similares dentro del mismo sector, y segundo, la comparación temporal que aplica para activos maduros con larga historia donde se puede realizar la valoración basada en valoraciones pasadas del mismo activo siguiendo los múltiplos respectivos.

A modo de ejemplo, suponga que una empresa del sector de alimentos está valorada en \$ 10.000, y en su último año presentó un EBITDA de \$800, por tanto, esta empresa presenta un múltiplo de VALOR/EBITDA de 12.5. Otra empresa del mismo sector, presente en el mismo mercado, con un portafolio de productos comparable, presentó un EBITDA de \$200 en el último año. Por tanto según el múltiplo calculado del activo similar esta empresa tiene un valor estimado de \$2.500.

Este método es bastante sencillo, fácil de aplicar y de justificar. No obstante, presenta ciertas falencias como el hecho de que parte del supuesto que el mercado realiza adecuadamente las valoraciones del activo similar, lo cual no es siempre cierto y por tanto se puede incurrir en valoraciones inadecuadas; otra posible desventaja consiste en la imposibilidad de encontrar en el mercado activos con características suficientemente similares al activo que se desea valorar, obligando así a basar la valoración en la de otro activo con diferencias significativas.

### **1.3. Valoración contingente**

La valoración relativa o vía DCF no permite considerar dentro del valor del activo los casos donde se pueden generar flujos bajo la ocurrencia de ciertos eventos, por tanto se requieren otros métodos como la valoración contingente. Ésta, como su nombre lo indica, busca capturar el valor que el activo puede generar cuando ocurren ciertas contingencias.

Por sus similitudes estructurales en cuanto a su definición y características de ejercicio, las herramientas en las que se basa la valoración contingente son los modelos de valoración de opciones financieras (Damodaran, 1999).

La valoración contingente se puede categorizar de dos maneras dependiendo del tipo de activo a valorar, activo financiero o activo real. Para el caso de activos financieros, dado que regularmente son transados en mercados organizados, se puede implementar con mayor facilidad un modelo de valoración por opciones financieras al existir información disponible de base para estimar sus parámetros. Por otro lado, para el caso de activo reales ha tomado fuerza el desarrollo de modelos de valoración vía opciones reales, los cuales buscan asignar un valor a la posibilidad que pueden presentar algunos proyectos de hacer modificaciones a futuro en sus inversiones productivas como respuesta a la evolución del negocio en el que se encuentran. La implementación de este tipo de valoraciones es más compleja, pues al no ser estos activos o proyectos transados en un mercado organizado, se dificulta la identificación de los componentes de la opción financiera equivalente y la estimación de variables necesarias para la valoración (Damodaran, 1999).

Debido a la naturaleza de las inversiones a valorar en este trabajo, y teniendo en cuenta el gran componente estocástico de este tipo de inversiones adicional a la imposibilidad de encontrar activos similares ya valorados en el mercado, se considera que el enfoque apropiado para la valoración debe ser la valoración contingente utilizando las herramientas proporcionadas por la teoría de opciones reales.

En la literatura el tema de opciones reales ha tenido un fuerte auge en la última década con grandes aportes. El sector eléctrico no fue ajeno a este desarrollo y diferentes autores han implementado el enfoque de opciones reales para valorar proyectos de inversión en generación eléctrica. Por ejemplo, Contreras y Muñoz (2009) realizan una valoración del riesgo de las inversiones en proyectos eólicos de generación eléctrica mediante opciones reales; los autores evalúan la opción de ejecutar, esperar o abandonar un proyecto de generación propuesto en España. Ellos plantean una metodología de valoración en la cual a partir de la modelación de los precios de venta de la energía y del viento esperado se construye el proceso estocástico de los flujos de caja del proyecto, y posteriormente se supone que la inversión se realiza en diferentes momentos del tiempo, encontrando así el proceso estocástico asociado al Valor Presente Neto (VPN) del proyecto, el cual haciendo la analogía con las opciones financieras es el activo subyacente. Una vez estimados sus parámetros estos son los insumos para valorar la opción de ejecutar, esperar o abandonar con el método de árboles trinomiales. Los autores plantean diferentes escenarios para experimentar con el método de valoración propuesto variando diferentes aspectos de la inversión, como el porcentaje de financiamiento, el costo de la inversión, el incremento anual de la inversión (en caso de esperar para invertir), la aversión al riesgo del inversor, la volatilidad de los precios de venta, parámetros de la distribución del viento, entre otros escenarios.

Caporal y Teixeira (2008) realizan la valoración de un proyecto de inversión en una pequeña central hidroeléctrica (30 MW) en Brasil teniendo en cuenta las flexibilidades de gestión presentes en la operación comercial de la central, donde cada año se tiene la opción de firmar un contrato para vender su producción de energía por los próximos 5 años a un precio estable o de lo contrario someterse a la venta de energía en bolsa con un precio altamente volátil. Para valorarlo, se ajusta un modelo al precio de bolsa con el fin de obtener el flujo de caja estocástico en base al cual se puede calcular un VPN del proyecto también de naturaleza estocástica. Sobre este último se estiman los parámetros necesarios vía simulación Monte Carlo. Finalmente con la estimación encontrada implementan el método de árboles binomiales para encontrar el valor de la opción en cada año, análogo al aplicado para valorar opciones financieras. Los autores concluyen que el valor del proyecto de generación hidroeléctrico planteado teniendo en cuenta las flexibilidades comerciales calculado vía opciones reales es 1.4 veces mayor que el valor encontrado mediante la valoración por DCF, pues este no considera las posibles flexibilidades comerciales de la central.

Siguiendo otro enfoque, Frayer y Uludere (2001) demuestran que el valor de una planta de generación a gas natural que ofrece flexibilidades operativas con un rápido arranque, aun así presente un costo marginal de generación mayor, es más valiosa que una planta a carbón con un bajo costo marginal. Realizan la comparación valorando primero ambas inversiones por el método clásico DCF, y posteriormente, teniendo en cuenta las fluctuaciones del precio de combustible y del precio de la energía, ajustan un proceso estocástico a la utilidad neta por kWh vendido, dado por la resta entre el precio de la energía y el precio del combustible. Vía simulación Monte Carlo estiman los parámetros del proceso estocástico, y luego calculan el valor de la opción utilizando la fórmula de Black-Scholes. Los autores demuestran que el método de flujo de caja descontado subvalora ambos proyectos. Teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al precio de venta y el precio de los combustibles, la planta a carbón y a gas incrementan en dos y siete veces su valor, respectivamente.

## 2. Definición metodología

### 2.1. Caracterización flexibilidades

A continuación se describen brevemente las flexibilidades más interesantes de analizar en un proyecto de generación eléctrica por medio del enfoque de opciones reales, dado el potencial valor adicional que le puede agregar a este tipo de proyectos.

- Flexibilidades operativas

La tecnología utilizada en un proyecto de generación puede ofrecer grandes ventajas operativas frente a las demás plantas, sin embargo, estas ventajas no logran ser valoradas en los métodos de valoración clásicos. Por ejemplo, las plantas térmicas requieren de un periodo de calentamiento progresivo hasta llegar a su capacidad nominal, con el objetivo de que los deltas de temperatura no dañen sus partes. De la duración de este periodo, que varía según la tecnología de la planta y los materiales utilizados en su construcción, depende la posibilidad de capturar los picos intradiarios del precio de la energía, los cuales resultan en una mayor rentabilidad. En este orden de ideas, una planta que tarda 6 horas en alcanzar su máxima potencia, seguramente no logrará sacar provecho de las horas pico del día, mientras que una que se demore menos de 1 hora en alcanzar su máxima carga sí podría tener esta posibilidad. Por supuesto ello dependerá a su vez de las reglas de operación y despacho del sistema en cuestión.

Por otro lado, la selección de ciertas tecnologías puede permitir la participación de la planta en el mercado de control de frecuencia, *Automatic Generation Control* (AGC). Este mercado, que está reservado para plantas con gran flexibilidad de subir y bajar carga en periodos muy cortos, ofrece ingresos adicionales que no logran ser capturadas por el flujo de caja convencional, pues depende de ciertas condiciones operativas del sistema.

- Flexibilidades comerciales

Una de las principales decisiones en la gestión comercial de un activo de generación es el nivel de contratación. Al estar contratado se tiene la obligación de entregar la cantidad de energía pactada a un precio estable y de lo contrario, al no estarlo no se tiene ninguna obligación de entrega de energía y los ingresos por generación se encuentran sujetos a las fuertes volatilidades del precio de la energía spot. Los métodos tradicionales de valoración permiten incluir el nivel de contratación en el proceso, aun así estos dejan a un lado la posibilidad de realizar la decisión de contratación en diferentes momentos de acuerdo a la evolución del mercado durante toda la vida útil del activo, buscando la maximización del beneficio. Esta flexibilidad es valorada en el artículo de Caporal y Teixeira (2008) para una central hidroeléctrica de 30 MW.

- Flexibilidades de inversión

La inversión en un activo de generación requiere que se examine de manera cuidadosa el momento apropiado para realizarla. Invertir de manera prematura cuando se esperan precios bajos de la energía para el corto y mediano plazo, posiblemente tenga menor valor que la inversión realizada en un momento futuro, donde los precios esperados sean más atractivos. Adicionalmente es conveniente definir el tamaño adecuado de la planta, en capacidad instalada,

según las condiciones del mercado. Es posible que sea más valioso tener una planta con capacidad media o baja si se esperan precios medios y por tanto una despachabilidad media-alta que una planta de gran capacidad con factores de despacho bajos. Por último, dependiendo el tipo de proyecto es posible tener la opción de expandirse en el futuro si el mercado presenta la oportunidad; por tanto es de interés estimar el valor que tendría esta flexibilidad de inversión, lo cual es posible mediante el enfoque de opciones reales.

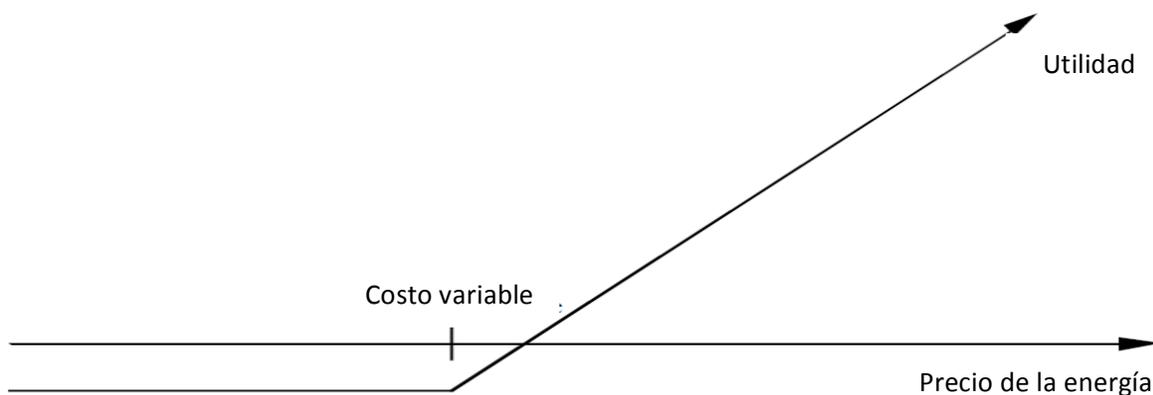
Es importante resaltar que la valoración por medio de opciones reales, en caso de que el proyecto de generación no presente ninguna de las flexibilidades mencionadas, no debe reducir el valor del proyecto en referencia al valor encontrado por flujo de cada descontado.

Aunque existen otros tipos de flexibilidades que se pueden analizar, estas son las que se considera que más valor le pueden agregar a un proyecto de generación eléctrica.

Debido a que el análisis y la implementación de la metodología de valoración por opciones reales no son fácilmente extensibles de un tipo de flexibilidad a otra, la presente investigación se enfocó en la valoración de la flexibilidad operativa que tienen los motores reciprocantes como tecnología de generación térmica con rampas de arranque y parada muy cortas; característica que los diferencia de sus principales competidores, las turbinas de vapor y de gas, en el mercado eléctrico colombiano.

## 2.2. Descripción de la metodología

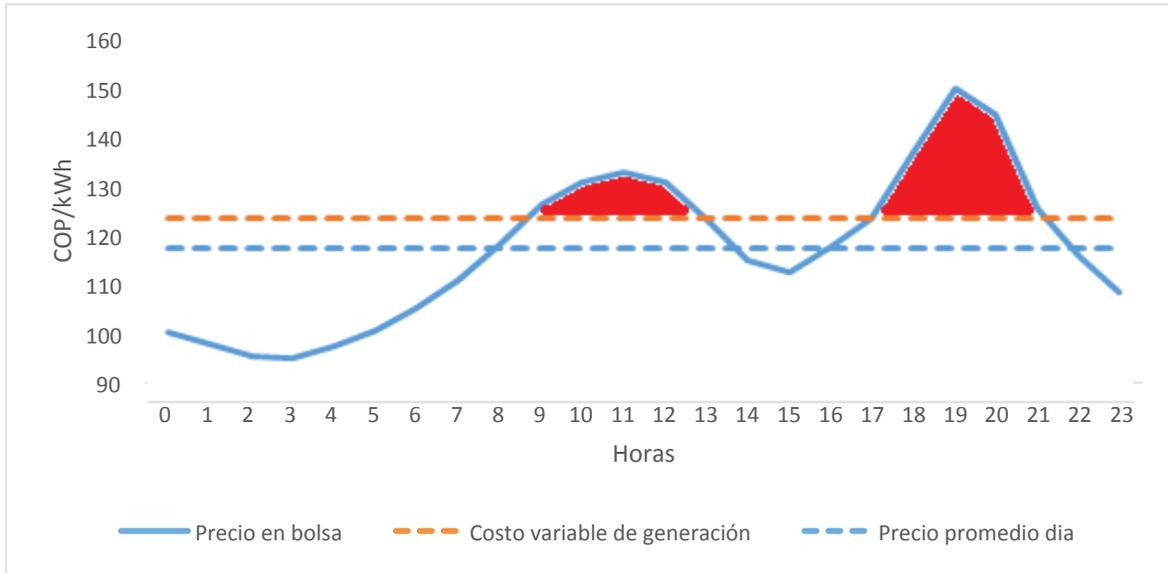
Para implementar el método de valoración contingente utilizando opciones reales para valorar la flexibilidad operativa, se requiere definir los eventos en los que se generan los flujos de caja contingentes. Para el caso en estudio, se presentan flujos de caja solo cuando el precio de venta (en bolsa) es superior al costo variable de generación (incluyendo los costos de arranque en caso de estar apagada la planta), de otro modo no resulta económicamente racional operar. Según esto, el diagrama de rentabilidad horaria, presentado en la Figura 1, es análogo al perfil de pago de una opción call europea utilizando como activo subyacente el precio de la electricidad.



**Figura 1** Diagrama de rentabilidad horario para una planta de generación.

Para mayor ilustración, a modo de ejemplo hipotético, las áreas sombreadas de la Figura 2 representan los momentos de ejercicio de la opción, pues en esos momentos el precio del activo

subyacente, es decir el precio de la electricidad, es mayor que el precio de ejercicio que está dado por el costo variable de generación.



**Figura 2.** Ejemplo del momento de ejercicio de la opción

Se nota entonces la necesidad de definir un modelo del precio en bolsa intradiario de la electricidad, pues al trabajar con un único precio diario (línea punteada inferior en la Figura 2) no se logra capturar la posibilidad de generación en las horas pico del día. Adicionalmente, se estableció una metodología para definir el costo variable de generación según las características técnicas de la planta a valorar y su curva de arranque y parada.

Adicionalmente, es importante resaltar los supuestos principales bajo los cuales esta metodología fue desarrollada:

- En caso de que el precio en bolsa supere el costo variable de generación, el despacho de la planta corresponderá al máximo de su capacidad menos el porcentaje de su indisponibilidad histórica.
- Ninguna porción de la generación de la planta se encuentra contratada, es decir toda su generación está sujeta a los precios de mercado spot (bolsa).
- En el cálculo del costo variable de generación se encuentra incluido el costo de arranque y paro de la planta.
- La tasa de descuento bajo la cual se traen a valor presente los flujos de caja contingentes es la misma utilizada para la metodología de flujo de caja descontado tradicional.

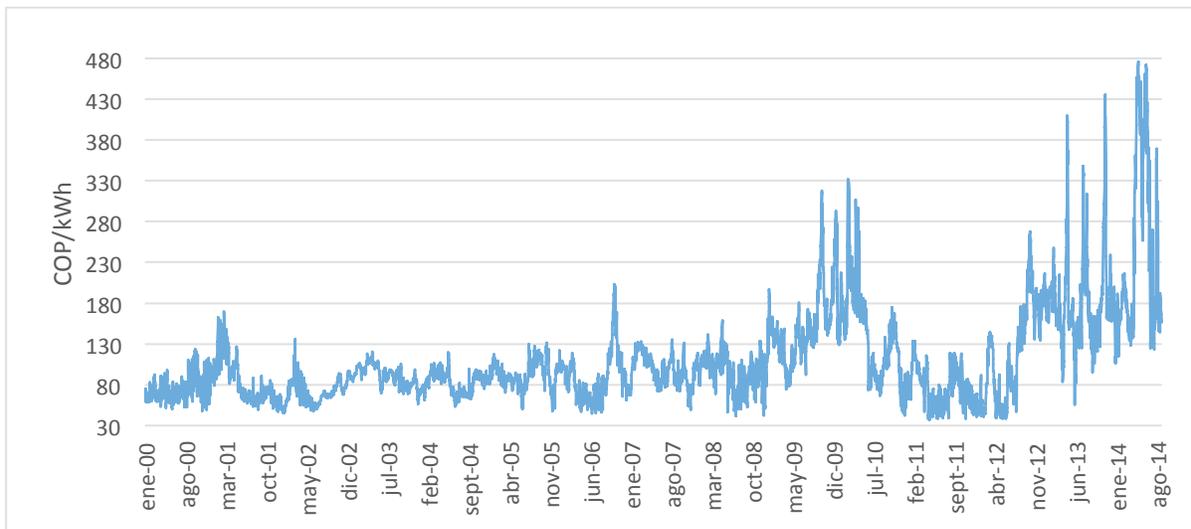
### 2.3. Modelo estocástico del precio en bolsa

Como se estableció en la sección anterior, para llevar a cabo la valoración se requiere un modelo mediante el cual se pueda representar el comportamiento futuro del precio en bolsa de la energía, el cual es la principal fuente de incertidumbre en la valoración. La resolución necesaria para el modelo planteado debe ser intradiaria, por bloques horarios de precios, pues una resolución

menor sería inadecuada para capturar las flexibilidades operativas de interés y una resolución mayor resulta demasiado dispendiosa, poco parsimoniosa y su aporte relativo a la evaluación no es tan significativo.

La generación y los precios de venta utilizados para la valoración de proyectos clásica (vía flujo de caja descontado) provienen de la proyección de los precios futuros mensuales de la energía los resultados del SDDP (por sus siglas en inglés: Stochastic Dual Dynamic Programming), un modelo de optimización dinámica dual estocástica que permite simular la operación del sistema en un horizonte de tiempo, bajo el criterio de mínimo costo. Los resultados mensuales del costo marginal del sistema provenientes del SDDP, son utilizados como entrada para el proceso estocástico a ajustar alrededor de esta media mensual.

Para proponer un modelo del precio en bolsa primero se realizó un análisis estadístico de la serie histórica de precios de bolsa. La Figura 3 ilustra la historia del precio de bolsa en Colombia (precios contantes a julio 2014) con resolución diaria desde enero del año 2000 a agosto de 2014.



**Figura 3.** Precio en bolsa de la energía, resolución diaria.

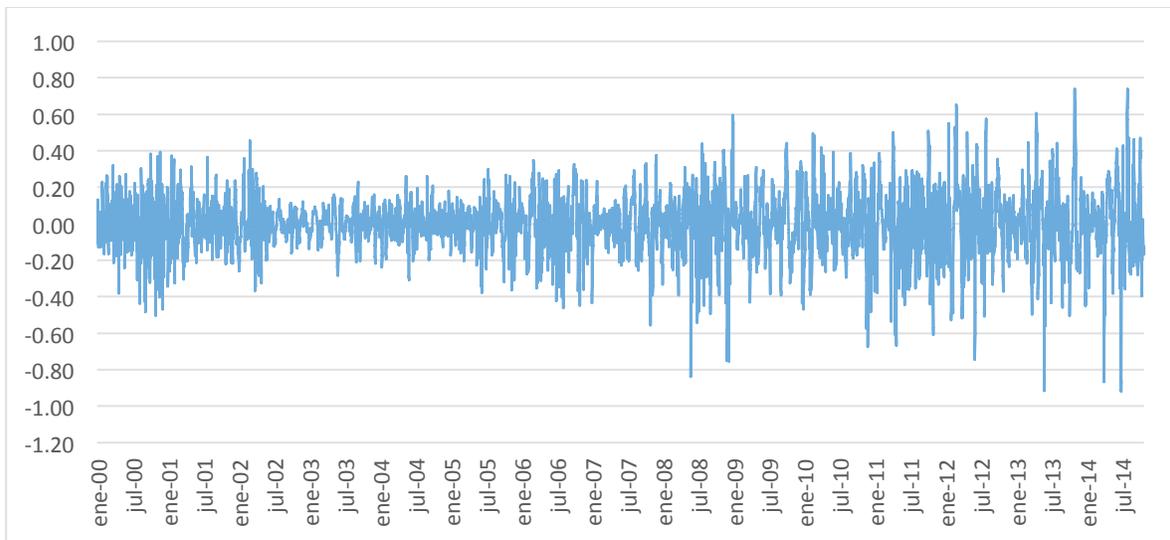
La estadística descriptiva de la serie del precio de bolsa es presentada en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Estadística descriptiva Precio en bolsa

<b>Número de datos</b>	5,352
<b>Media</b>	110
<b>Error típico</b>	1
<b>Mediana</b>	93
<b>Desviación estándar</b>	59
<b>Varianza</b>	3,495
<b>Coefficiente de variación</b>	54%
<b>Curtosis</b>	12
<b>Coefficiente de asimetría</b>	3
<b>Rango</b>	440
<b>Mínimo</b>	36
<b>Máximo</b>	476
<b>Percentil 5%</b>	54
<b>Percentil 95%</b>	209

Se observa el amplio rango de valores en los que fluctúa el precio de la energía, con una notable alza en los últimos años analizados. Se presenta un elevado coeficiente de variación lo que indica que los datos son altamente volátiles, y a su vez gráficamente se observa que la volatilidad no permanece constante en el tiempo (ver Figura 5). Asimismo se puede identificar el comportamiento no estacionario de la serie.

Partiendo del pronóstico de la media del mes (proveniente del SDDP) y aplicando logaritmo natural a la serie, con el fin de suavizar los picos al disminuir su varianza, se obtiene la serie de precios transformada presentada en la Figura 4 representada por la ecuación (1) que será la serie objeto de la modelación.



**Figura 4.** Transformación de la serie Precio en bolsa, con resolución diaria.

$$\begin{aligned}
\beta_t &= \text{promedio}(PB_i: \forall i \in \text{mes de } t) \\
PB_t &= e^{X_t} \\
Y_t &= X_t - \ln(\beta_t) \\
PB_i &: \text{Precio en bolsa día}
\end{aligned}
\tag{1}$$

En aras de modelar la serie transformada descrita por la ecuación (1), se revisó la literatura disponible en el tema. Diferentes autores (Schwartz (1997), Geman (2007) y Cartea & Figueroa (2005)) proponen un proceso de reversión a la media para modelar el precios de diferentes commodities, incluido la energía, en diversos mercados internaciones. Por ejemplo, autores como Osorio (2002), Diaz (2008), Gil y Maya (2008) y Barrientos, Rodas, Velilla, Lopera y Villada (2012) lo hacen para el mercado eléctrico colombiano. A partir de esta revisión, se encontró que un proceso de reversión a la media es adecuado para representar el comportamiento de la serie presentada en la Figura 4.

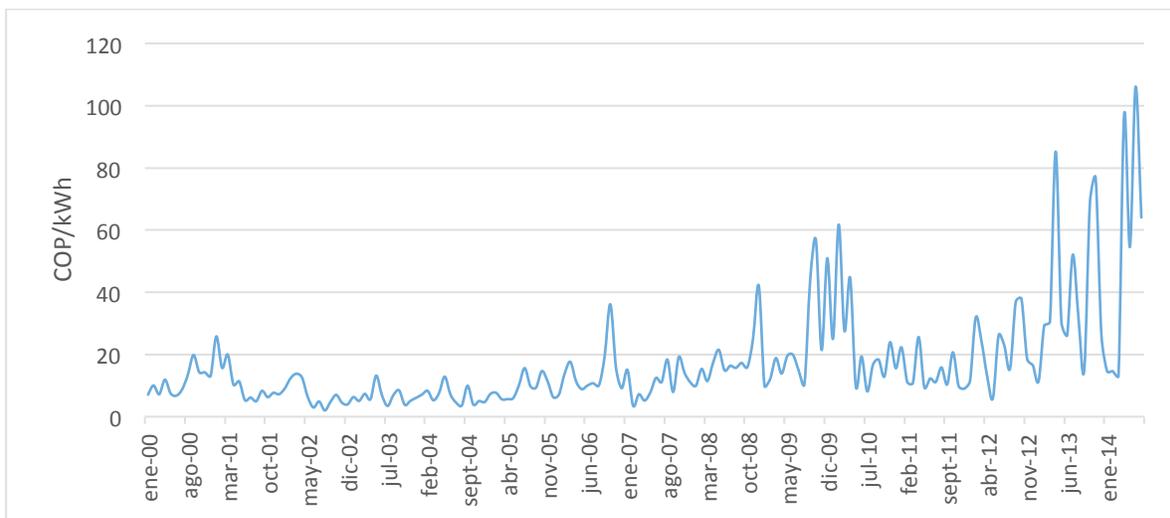
El modelo de reversión a la media puede ser representado por la discretización de la ecuación diferencial estocástica asociada presentada en la ecuación (2).

$$Y_t = Y_{t-1} + \alpha(\mu - Y_{t-1})\Delta t + \varepsilon_t \tag{2}$$

Donde  $\varepsilon_t$  representa el componente estocástico del modelo dado por la varianza.

Como se mencionó anteriormente, la volatilidad del precio en bolsa es variable en el tiempo, evidencia de ello se presenta en la Figura 5, donde la desviación estándar mensual muestra cambios notables entre periodos de tiempo diferentes, con un alza en la volatilidad en periodos de precios altos.

Estos hechos dejan en evidencia la heterocedasticidad de la serie de precios, es decir del cambio temporal presente en la varianza de los datos. Por tal motivo sería inadecuado, indiferentemente del modelo de precios planteado, suponer una varianza constante y por tanto es necesario recurrir a los modelos de varianza condicionada.



**Figura 5.** Desviación estándar mensual precio en bolsa.

Para verificar si los datos pueden ser representados por este modelo de varianza, se realiza una prueba F (de Fisher) para definir si la varianza de los datos de un mes puntual es igual a la varianza de los datos de los demás meses, uno a uno. En caso de no rechazar la hipótesis nula, habría evidencia estadística de que los datos provienen de una población con la misma varianza y en caso contrario, se rechazaría que los grupos de datos provengan de una población con igual varianza. El valor p del test es presentado en la Tabla 3 donde los pares de meses en los que no se rechaza la prueba a un nivel de significancia del 95% se encuentran en negrilla.

**Tabla 3.** Valor p de la prueba de hipótesis de igualdad de varianzas

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>Enero</b>	1.00	0.00	<b>0.05</b>	0.00	0.03	0.00	0.00	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Febrero</b>	0.00	1.00	0.03	0.00	<b>0.05</b>	0.00	<b>0.90</b>	0.04	0.04	0.01	<b>0.12</b>	<b>0.36</b>
<b>Marzo</b>	<b>0.05</b>	0.03	1.00	0.00	<b>0.84</b>	0.00	0.02	<b>0.98</b>	<b>0.98</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Abril</b>	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	<b>0.60</b>	0.00	0.00	0.00	<b>0.19</b>	0.02	0.00
<b>Mayo</b>	0.03	<b>0.05</b>	<b>0.84</b>	0.00	1.00	0.00	0.03	<b>0.87</b>	<b>0.86</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Junio</b>	0.00	0.00	0.00	<b>0.60</b>	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.42</b>	<b>0.08</b>	0.01
<b>Julio</b>	0.00	<b>0.90</b>	0.02	0.00	0.03	0.00	1.00	0.02	0.03	0.01	<b>0.14</b>	<b>0.42</b>
<b>Agosto</b>	<b>0.05</b>	0.04	<b>0.98</b>	0.00	<b>0.87</b>	0.00	0.02	1.00	<b>0.99</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Septiembre</b>	<b>0.05</b>	0.04	<b>0.98</b>	0.00	<b>0.86</b>	0.00	0.03	<b>0.99</b>	1.00	0.00	0.00	0.00
<b>Octubre</b>	0.00	0.01	0.00	<b>0.19</b>	0.00	<b>0.42</b>	0.01	0.00	0.00	1.00	<b>0.34</b>	<b>0.10</b>
<b>Noviembre</b>	0.00	<b>0.12</b>	0.00	0.02	0.00	<b>0.08</b>	<b>0.14</b>	0.00	0.00	<b>0.34</b>	1.00	<b>0.50</b>
<b>Diciembre</b>	0.00	<b>0.36</b>	0.00	0.00	0.00	0.01	<b>0.42</b>	0.00	0.00	<b>0.10</b>	<b>0.50</b>	1.00

Se observa de la Tabla 3 que es inadecuado utilizar el mismo modelo de varianza para todos los meses pues estos no provienen de la misma población, dicho de otro modo, la dinámica entre meses del precio en bolsa no es la misma. Asimismo, es interesante notar que no hay una clara definición de clusters o grupos de meses que presenten la misma dinámica, ni siquiera aquellos grupos de meses considerados con el mismo comportamiento climático. Por estas razones es necesario proponer un modelo de precios para cada mes del año a partir de los 15 años de historia disponibles.

Para el ajuste del proceso se probaron los tres modelos de varianza condicional más utilizados para cada uno de los meses: el GARCH(p,q) lineal, el EGARCH(p,q) y el GJR(p,q). Para todos los meses, el de mejor ajuste según el criterio AIC y BIC, fue el GARCH(1,1) con innovaciones t-student estandarizadas. Como resultado de esta prueba, se concluyó que el precio en bolsa puede ser explicado por el mismo modelo estocástico, con diferentes parámetros para cada mes del año.

La descripción del modelo mensual es representada por las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$Y_t = Y_{t-1} + \alpha(\mu - Y_{t-1})\Delta t + \sigma\varepsilon_t \quad (3)$$

$$\varepsilon_t = h_t z_t \quad \therefore z_t \sim tstudent(\delta) \quad (4)$$

$$h_t^2 = \beta_0 + \beta_1 h_{t-1}^2 + \beta_2 \varepsilon_{t-1}^2 \quad (5)$$

La estimación de los respectivos parámetros para cada modelo fue realizada por el método de máxima verosimilitud implementada en el software Matlab (Versión 2013a). Los resultados son presentados en la Tabla 4.

La validación respectiva de cada modelo se realizó verificando el ajuste apropiado con propiedades deseables de los residuales y realizando test ‘in-sample’ del modelo propuesto. Se puede notar que en la estimación los valores de  $\mu$  y  $\beta_0$  son cero, ya que el proceso transformado presentado en la Figura 4 es estacionario débil alrededor de cero, por tanto los coeficientes independientes mencionados tendrán un valor cercano a cero. El parámetro  $\sigma$  representa la desviación estándar de la variable  $z_t$ , por tal motivo no hace parte de la estimación.

**Tabla 4.** Estimación de parámetros por máxima verosimilitud

	$\mu$	$\alpha$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\delta$
<b>Enero</b>	0	86.73	0	0.46	0.54	3.05
<b>Febrero</b>	0	63.30	0	0.56	0.44	2.91
<b>Marzo</b>	0	85.04	0	0.67	0.33	3.17
<b>Abril</b>	0	47.15	0	0.74	0.26	3.24
<b>Mayo</b>	0	96.20	0	0.60	0.30	3.36
<b>Junio</b>	0	88.75	0	0.75	0.25	3.90
<b>Julio</b>	0	86.81	0	0.72	0.28	4.02
<b>Agosto</b>	0	111.53	0	0.81	0.19	4.36
<b>Septiembre</b>	0	95.33	0	0.79	0.18	6.36
<b>Octubre</b>	0	44.63	0	0.61	0.39	2.77
<b>Noviembre</b>	0	77.06	0	0.61	0.39	4.66
<b>Diciembre</b>	0	76.87	0	0.83	0.17	3.78

Con el modelo propuesto en (3) a (5) es posible representar el comportamiento mes a mes del precio en bolsa diario. No obstante, como se mencionó anteriormente, para cumplir el objetivo de la valoración de flexibilidades de naturaleza operativa se requieren precios intradiarios de la energía. Para hacerlo, se realizó un estudio del comportamiento del precio horario para la serie a partir de 2012 a la fecha. Se concluyó que los precios de bolsa en Colombia se pueden dividir en tres bloques: precio bajo, medio y alto, los cuales son descritos en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Descripción de los bloques de precios establecidos

	<b>Horas</b>	<b>Total de horas</b>
<b>Precio Bajo</b>	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 23	8
<b>Precio Medio</b>	7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22	11
<b>Precio Alto</b>	11, 12, 18, 19, 20	5

Durante cada uno de esos bloques descritos en la tabla anterior, el comportamiento del precio en bolsa varía debido a los cambios en la demanda. La variación promedio durante cada bloque respecto a la media del día presentada en el periodo estudio, es mostrada en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Factores de multiplicación del precio en bolsa por bloque respecto a la media diaria

	Bajo	Medio	Alto
<b>Enero</b>	88.3%	102.1%	114.1%
<b>Febrero</b>	90.7%	101.7%	111.3%
<b>Marzo</b>	87.5%	101.9%	115.9%
<b>Abril</b>	86.8%	103.2%	114.1%
<b>Mayo</b>	85.0%	102.8%	117.9%
<b>Junio</b>	81.6%	105.1%	118.3%
<b>Julio</b>	79.9%	104.9%	121.3%
<b>Agosto</b>	83.7%	104.4%	116.4%
<b>Septiembre</b>	88.6%	103.3%	111.0%
<b>Octubre</b>	89.0%	103.5%	110.0%
<b>Noviembre</b>	87.2%	104.4%	110.8%
<b>Diciembre</b>	89.7%	103.1%	109.6%

De este modo queda ajustado un modelo estocástico del precio en bolsa de resolución intradiaria, con tres bloques de precios (alto, medio y bajo) para cada día, según el mes del año. Todo esto construido partiendo del pronóstico de la media mensual obtenido a partir de la simulación del software SDDP.

#### 2.4. Definición del costo variable

Como se ilustró en la Figura 1, los flujos de caja contingentes tendrán lugar solo cuando se presente un precio de bolsa mayor que el costo variable de generación de la planta. Por tanto se requiere ser cuidadoso a la hora de definir el costo variable de generación de cada proyecto que depende del tipo de tecnología de la planta, el tipo de combustible y la rampa de arranque requerida desde frío. Para plantas térmicas este costo está dado por (6) donde  $t$  está dado en días y  $e$  representa el estado diario de la planta (frío o caliente).

$$\text{Costo Variable}_{t,e} = (CSC_t + CTC) * HR_e + COM + OCV \quad (6)$$

$CSC_t$ : Costo de suministro de combustible en  $t$

$COM$ : Costo de operación y mantenimiento

$CTC$ : Costo de transporte de combustible

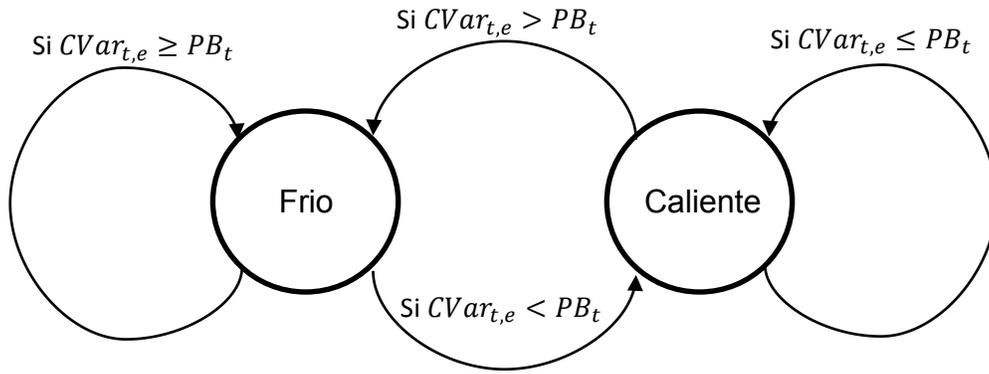
$OCV$ : Otros costos variables

$HR_e$ : Heat Rate de la planta en el estado  $e$

Como se puede observar el costo variable está dado en función de dos factores: el factor temporal que implica posibles variaciones del precio del combustible descrito en la ecuación por  $CSC_t$ , y el factor del estado actual en que se encuentra la planta, que afecta la eficiencia de la misma y se encuentra explícito en la ecuación por el término  $HR_e$  (que hace referencia al Heat Rate<sup>1</sup>). Para la

<sup>1</sup> Término utilizado comúnmente para indicar la eficiencia de una planta. Representa el número de unidades requeridas de energía (BTU) para producir una unidad de electricidad (kWh).

metodología planteada se supondrán únicamente dos estados, frío y caliente. El estado caliente es el de mayor eficiencia de la planta y este se da cuando la planta en el día anterior estuvo activa; por el contrario, el estado frío representa la eficiencia de la planta ponderada según su rampa de arranque, suponiendo de este modo que el día anterior se encontraba inactiva. Las posibles transiciones entre estados están presentadas en la Figura 6.



**Figura 6.** Descripción de los posibles estados en  $t + 1$  y condiciones de transiciones

Se observa en la Figura 6, el estado de la planta mañana depende del precio en bolsa de hoy, el cual ha sido modelado como un proceso estocástico, y por tanto el costo variable de generación se ve afectado por el comportamiento incierto del precio. Aun así, cabe anotar que para este modelo, el costo variable es una función determinista para cada trayectoria del precio en bolsa.

Al simplificar el esquema únicamente con dos posibles estados se debe plantear un método para calcular cada factor de eficiencia de la planta,  $HR_e$ , según su estado. Para el caso de estado caliente, se toma el valor de máxima eficiencia de la planta (que es representado por el mínimo Heat Rate). Por otra parte, para el caso del cálculo de la eficiencia en estado frío se realiza un promedio ponderado de su rampa de arranque horaria en eficiencia (Heat rate) con la carga asociada a cada periodo de arranque.

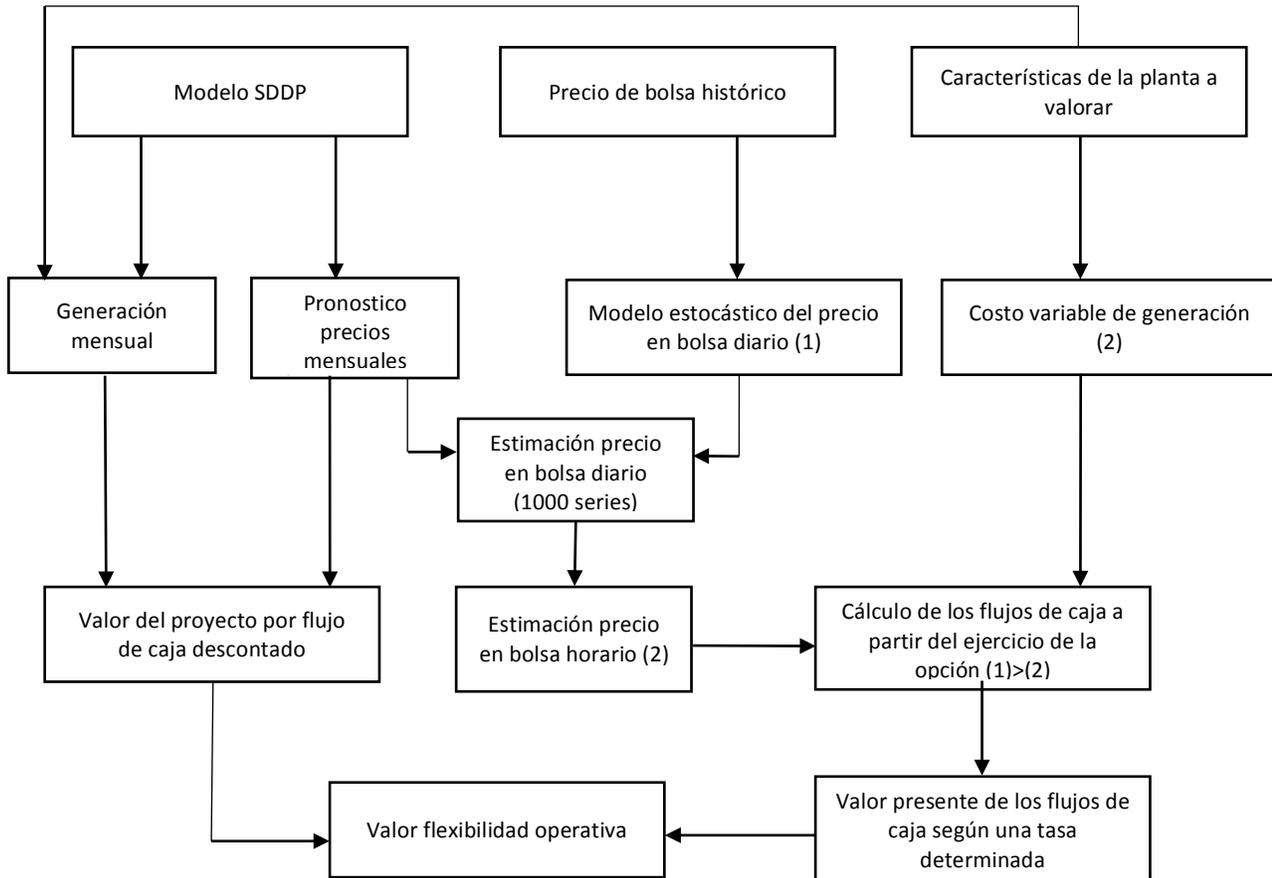
Un ejemplo del cálculo aplicado a una planta ficticia de 100 MW con una rampa de arranque de 8 horas es presentado en la Tabla 7. Los valores en negrilla representan la eficiencia para cada estado, el promedio ponderado para el estado frío y la eficiencia en la última hora (8va) de la rampa para el estado caliente.

**Tabla 7.** Ejemplo del cálculo de la eficiencia según el estado de la planta

Hora	Heat Rate (MBTU/MWh)	Potencia (MW)
1	25	15
2	20	20
3	18	25
4	16	30
5	12	70
6	10	85
7	9	95
8	<b>8</b>	100
Promedio Ponderado	<b>11.5</b>	

## 2.5. Implementación de la metodología de valoración de flexibilidades

A modo ilustrativo la Figura 7 presenta el diagrama de flujo de la metodología desarrollada.



**Figura 7.** Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

La metodología implementada para la valoración de la flexibilidad operativa de una tecnología de generación con periodos cortos de arranque, como lo son los motores reciprocantes, está basada en la simulación Monte Carlo. La metodología parte del precio en bolsa simulado a partir del modelo planteado en la sección 2.2 y de la media mensual tomada del SDDP; con esta información se generan tantas trayectorias del precio en bolsa futuro como se deseen (10.000 para la implementación presentada). A cada trayectoria se le calcula su costo variable respectivo descrito en la sección 2.4. Con las trayectorias del precio en bolsa y el costo variable se aplica el enfoque de opciones reales presentado en la Figura 1, para cada día y en cada uno de sus bloques. A partir de este cálculo se puede conocer la utilidad diaria de la planta suponiendo que la generación corresponderá al máximo de su capacidad menos el porcentaje de su indisponibilidad histórica. Para cada uno de las trayectorias se calcula el valor presente neto del proyecto con una tasa de descuento definida, el promedio del valor presente neto de cada una de las trayectorias converge al valor presente neto del proyecto a medida que el número de trayectorias se hace mayor.

Es importante aclarar que el enfoque dado a la metodología de valoración planteada es de simulación energética y por tanto no pretende ser rigurosa en el aspecto contable. En este caso se

supondrá únicamente una depreciación acelerada del activo y una tasa impositiva del 30% sobre las utilidades.

### 3. Resultados

#### 3.1. Planteamiento de experimentos

Con el fin de analizar el valor asociado a la flexibilidad operativa presente en la selección de tecnología de las diferentes plantas, se plantea el análisis de cuatro proyectos hipotéticos de generación cuyas características principales se encuentran descritas en la Tabla 8

**Tabla 8.** Descripción de proyectos de generación a valorar

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Tecnología</b>	Motores Reciprocantes	Ciclo combinado	Turbina de vapor	Turbina de vapor
<b>Combustible</b>	Gas	Gas	Carbón	Carbón
<b>Combustible Alternativo</b>	Fuel Oil 6	Fuel Oil 2	-	-
<b>Año de entrada</b>	2015	Activo	2021	Activo
<b>Capacidad Instalada [MW]</b>	204	450	300	154
<b>Inversión [USD/kW]</b>	1100	-	2076	-
<b>Costo de transporte de combustible [USD/MBTU]</b>	0.96	0.57	0	0
<b>Indisponibilidad histórica</b>	10%	14%	10%	15%

La rampa de arranque en carga y eficiencia para cada proyecto de generación a valorar esta descrita en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Rampa de arranque en eficiencia y carga para los proyectos definidos

<b>Periodo</b>	<b>Heat Rate [MBTU/MWh]</b>				<b>Carga [MW]</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	7.9	20.0	27.2	25.2	204	40	6	3
<b>2</b>	-	20.0	25.3	23.4	-	40	31	16
<b>3</b>	-	20.0	20.1	18.6	-	40	41	21
<b>4</b>	-	13.9	13.1	12.2	-	100	134	69
<b>5</b>	-	8.9	10.4	9.6	-	220	210	108
<b>6</b>	-	8.1	10.1	9.3	-	280	273	140
<b>7</b>	-	7.7	10.0	9.3	-	340	300	154
<b>8</b>	-	7.7	-	-	-	380	-	-
<b>9</b>	-	7.7	-	-	-	410	-	-
<b>10</b>	-	7.7	-	-	-	450	-	-

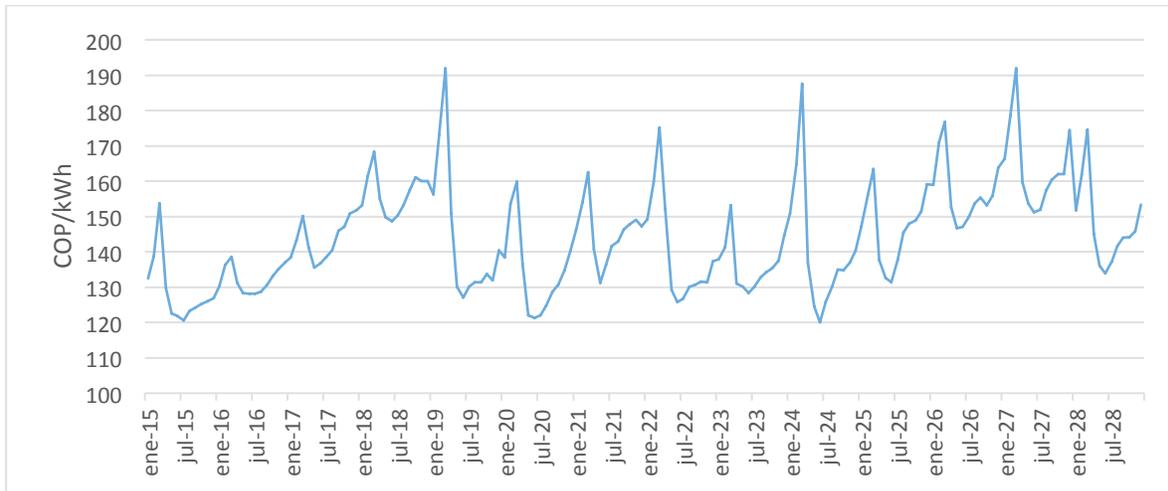
El precio de los combustibles utilizados como recurso de generación por los proyectos analizados es presentado en la **Tabla 9**. Se puede observar que el gas natural tiene un alza significativa de precio en el 2022 esto se debe a la necesidad de importar este combustible a causa de la escasez del gas natural local estimada para esta fecha. De igual forma se puede notar la diferencia entre el

precio de carbón del proyecto C y D, este diferencial se presenta actualmente en el mercado del carbón para las diferentes minas que abastecen a cada proyecto.

**Tabla 10.** Costo de combustible [USD/MBTU] para los proyectos planteados

	Gas Natural	Fuel Oil 2	Fuel Oil 6	Carbón C	Carbón D
<b>2015</b>	4.98	25.54	10.06	-	2.16
<b>2016</b>	5.51	25.14	9.74	-	2.21
<b>2017</b>	5.86	25.13	9.67	-	2.23
<b>2018</b>	6.39	25.40	9.79	-	2.24
<b>2019</b>	6.20	25.97	10.05	-	2.24
<b>2020</b>	5.83	26.44	10.30	-	2.26
<b>2021</b>	6.21	26.96	10.59	1.80	2.30
<b>2022</b>	14.92	27.53	10.90	1.88	2.34
<b>2023</b>	15.06	27.94	11.16	1.90	2.36
<b>2024</b>	15.22	28.33	11.42	1.87	2.36
<b>2025</b>	15.34	28.78	11.65	1.92	2.38
<b>2026</b>	15.47	29.14	11.89	1.93	2.40
<b>2027</b>	15.60	29.59	12.17	1.94	2.42
<b>2028<sup>2</sup></b>	15.26	28.55	11.53	1.91	2.37

Con el fin de comparar los métodos, para cada uno de los proyectos se realizará la valoración por la metodología de opciones reales propuesta y por la técnica convencional de flujo de caja descontado con los datos mensuales de generación y precio obtenidos de la optimización del SDDP. Los precios mensuales resultantes<sup>2</sup> del SDDP utilizados para la valoración son presentados en la Figura 8.

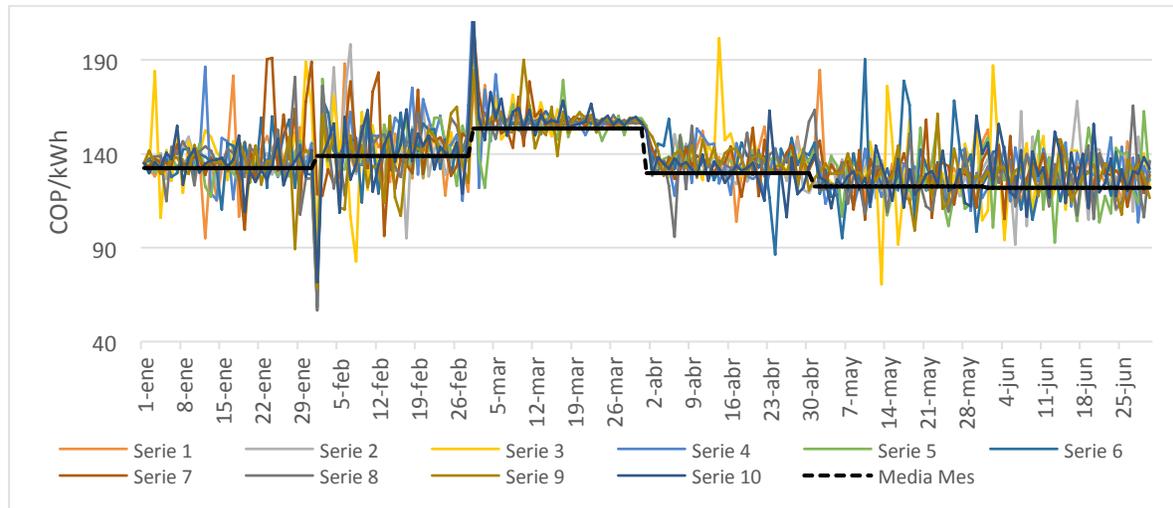


**Figura 8.** Estimación del precio mensual de la electricidad utilizado para la valoración

<sup>2</sup> Debido a la elevada incertidumbre, el precio para el 2028 en adelante este es tomado como el promedio de los precios en el periodo 2022 - 2027

Cabe anotar que la serie de precios presentada en la Figura 8 es el promedio de todas las series de precios obtenidas del SDDP, aun así para mayor rigurosidad se realiza la valoración para cada una de las series de precios (60) y se promedian los resultados.

A partir de los precios de bolsa mensuales provenientes del SDDP, se estimó el comportamiento del precio de bolsa diario utilizando el proceso de reversión a la media modelado por las ecuaciones (3) a (5). La **Figura 9** presenta un ejemplo de la estimación del precio de bolsa diario para el primer semestre de 2015 con 10 series simuladas.



**Figura 9.** Ejemplo de simulación del precio de bolsa diario para el 2015

La valoración se realiza para el periodo 2015-2054 por ambos métodos: flujo de caja descontado y opciones reales, con las siguientes características:

<b>Tasa de descuento</b>	12.56%
<b>Inflación</b>	3.50%
<b>Otros costos variables [COP/kWh]</b>	35.14
<b>TRM [COP/USD]</b>	1900.64

### 3.2. Resultados de las valoraciones

Para cada proyecto se contrasta el factor de planta<sup>3</sup> y el VPN con los resultados encontrados por la metodología de flujo de caja convencional; para los proyectos nuevos (A y C) se presenta el VPN del proyecto incluyendo los ingresos del cargo por confiabilidad (CxC).<sup>4</sup>

Es importante resaltar que la tasa de descuento utilizada es la misma para ambas metodologías de valoración. Mayor análisis se puede llevar a cabo en este sentido, dado que al ser modelada la

<sup>3</sup> Porcentaje de la energía real generada en referencia a su energía máxima si hubiera generado a plena carga durante el mismo periodo de tiempo.

<sup>4</sup> Remuneración fija otorgada a los generadores según sus obligaciones de energía firme (OEF), que tiene como objetivos principales incentivar la inversión en nuevos proyectos y garantizar la confiabilidad del sistema en periodos de escasez. Para mayor información ver Resolución CREG 071 de 2006.

volatilidad del precio de bolsa en la metodolodgía por opciones reales, en principio se podría pensar en una a reducción de incertidumbre que se reflejaría en una disminución en la tasa de descuento a ser considerada. Este análisis sobre cuál es la tasa de descuento más apropiada a utilizar, queda propuesto como trabajo futuro.

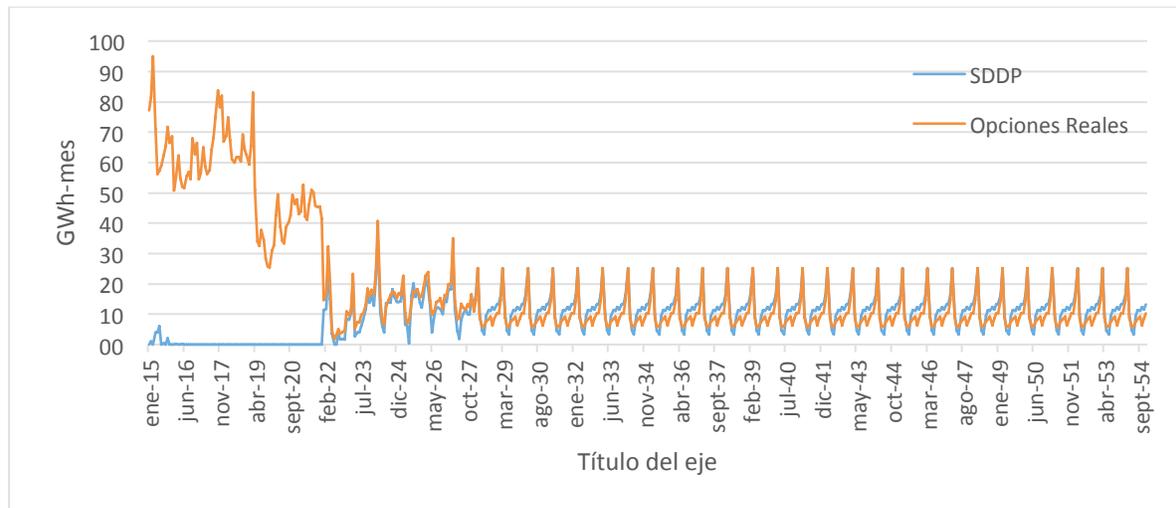
- **Proyecto A**

La Tabla 11 describe los resultados obtenidos de la valoración del proyecto A por ambos métodos: flujo de caja convencional y opciones reales.

**Tabla 11.** Comparación de resultados de la valoración del proyecto A (Mill. COP de 2014).

	Opciones Reales	Flujo de caja descontado
<b>Factor de Planta</b>	14.4%	6.7%
<b>VPN - Generación</b>	\$123,047	\$17,421
<b>VPN - Cargo por Confiabilidad</b>	\$ 378,268	\$ 378,268
<b>VPN Total</b>	\$ 501,315	\$ 395,689
<b>Inversión</b>	(\$ 426,360)	(\$ 426,360)
<b>VPN Proyecto</b>	\$ 74,955	(\$ 30,671)

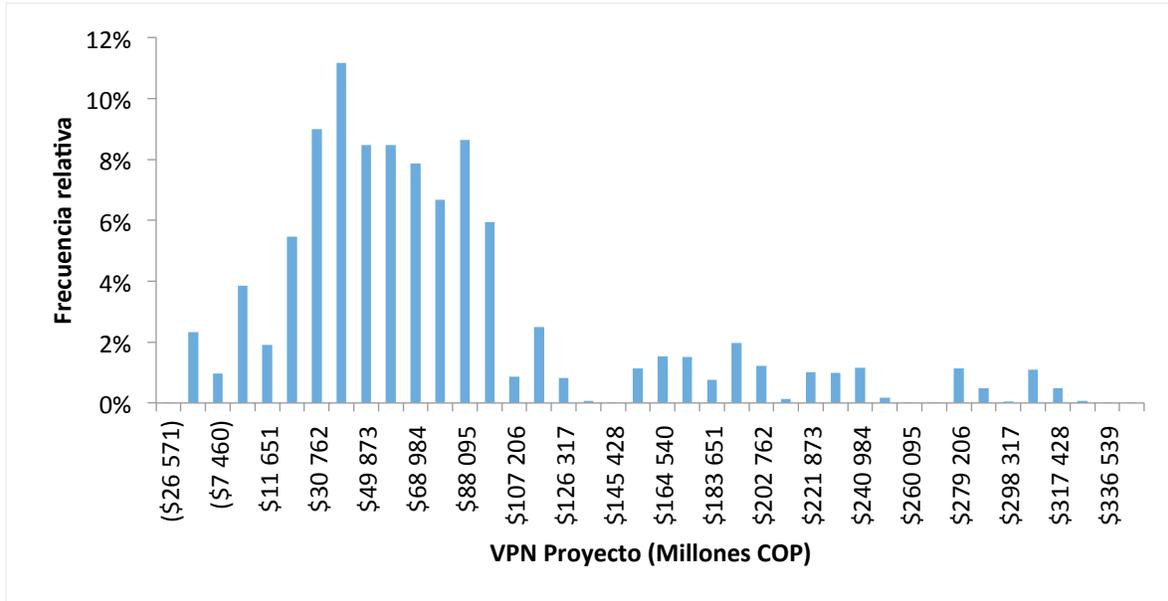
Se nota que el factor de planta por opciones reales es 2.14 veces mayor que el de DCF. Esto debido a la gran flexibilidad operativa reflejada en su corta rampa de arranque. En la **Figura 10** se contrastan ambas generaciones mensuales.



**Figura 10.** Comparación de generaciones a partir de ambos métodos de valoración (A).

Debido a este aumento en generación, el VPN asociado a la transacción en bolsa (excluyendo los ingresos por CxC) aumenta en 7.2 veces en comparación con el calculado por flujo de caja convencional. Este VPN de generación sumado al VPN de CxC y restando el costo de inversión, resulta en un VPN positivo de \$74.955 millones. Con el VPN positivo se puede argumentar la

viabilidad económica de este proyecto hipotético, contrario a los resultados obtenidos a partir del método flujo de caja descontado que concluían que este proyecto no genera valor. Al tratarse de una metodología basada en las simulaciones de Monte Carlo es importante analizar el histograma del VPN (ver **Figura 11**), construido en base al valor presente de los flujos generados a partir de cada una de las mil trayectorias del precio en bolsa generadas partiendo de cada serie del SDPP (60 series).



**Figura 11.** Histograma del valor presente neto del proyecto A

Queda entonces en evidencia el valor agregado que ofrecen los motores reciprocantes, debido a la flexibilidad operativa presente en esta tecnología. El valor de la flexibilidad está dado por la resta entre el valor de la inversión por opciones reales y el valor por flujo de caja descontado (que no tiene en cuenta la flexibilidad), en este orden de ideas el valor de la flexibilidad es de \$105.626. Cabe anotar que esta cifra representa un valor máximo de la flexibilidad pues la valoración parte del supuesto de la generación a máxima carga disponible en caso de que el precio en bolsa supere el costo variable.

- **Proyecto B**

La tecnología implementada por el proyecto B requiere una rampa de arranque significativamente larga (ver Tabla 9) derivando así en un costo variable de generación en estado frío elevado. Es de esperarse entonces que el nivel de despacho de la planta no se vea beneficiado por la metodología de opciones reales, así lo confirma la **Tabla 12** de resultados.

**Tabla 12.** Comparación de resultados de la valoración del proyecto B (Mill. COP de 2014)

	Opciones Reales	Flujo de caja descontado
<b>Factor de Planta</b>	39,36%	48,82%
<b>VPN</b>	\$ 188.908	\$ 114.213

Como se puede observar, el factor de despacho disminuyó en un 9% esto debido a la ausencia de flexibilidad operativa. Aun así, se puede notar que el valor del proyecto no disminuye y por el contrario se ve aumentado, este fenómeno se debe a que como su costo variable de generación aumentó la venta de energía se da a un precio mayor, derivando así en mayores utilidades en caso de que el precio en bolsa supere el costo variable.

- **Proyecto C**

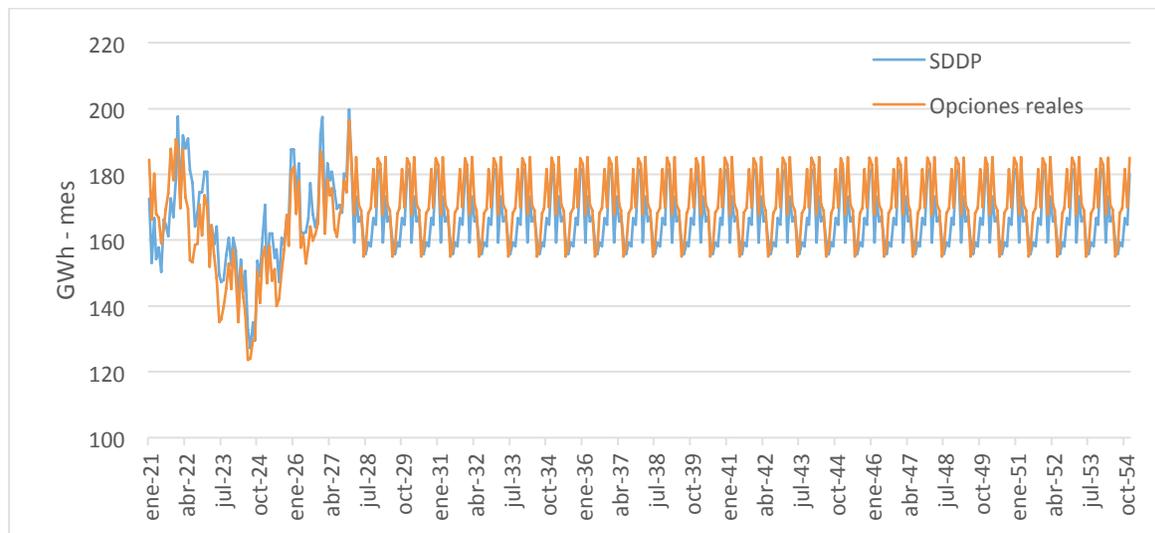
En la **Tabla 13** se encuentran los resultados de la valoración del proyecto C de generación.

**Tabla 13.** Comparación de resultados de la valoración del proyecto C (Mill. COP de 2014).

	Opciones Reales	Flujo de caja descontado
<b>Factor de Planta</b>	80.70%	75.47%
<b>VPN - Generación</b>	\$ 1,043,072	\$ 951,271
<b>VPN - Cargo por Confiabilidad</b>	\$ 556,276	\$ 556,276
<b>VPN Total</b>	\$ 1,599,348	\$ 1,507,547
<b>Inversión</b>	(\$ 1,183,320)	(\$ 1,183,320)
<b>VPN Proyecto</b>	\$ 416,028	\$ 324,227

El proyecto C al implementar una tecnología que no se caracteriza por su flexibilidad operativa no presenta un incremento tan significativo en su factor de despacho. Aun así se puede observar que el valor del proyecto por generación aumentó, esto se debe a que la venta de energía se da por precios intradiarios fluctuantes en ocasiones mayores a los del SDDP y que en caso de ser menores que su costo variable la planta no genera.

En la **Figura 12** se presenta el contraste de la generación mensual obtenida por ambos métodos de valoración, se puede verificar lo dicho anteriormente donde la generación por opciones reales no es significativamente superior a la analizada por flujo de caja descontado.



**Figura 12.** Comparación de generaciones a partir de ambas metodologías de valoración (C).

- **Proyecto D**

Los resultados valoración del proyecto D son presentados en la **Tabla 14**

**Tabla 14.** Comparación de resultados de la valoración del proyecto D (Mill. COP de 2014).

	<b>Opciones Reales</b>	<b>Flujo de caja descontado</b>
<b>Factor de Planta</b>	72,22%	66,93%
<b>VPN</b>	\$ 376.500	\$ 337.758

En la valoración por opciones reales del proyecto D tiene lugar un fenómeno similar a lo sucedido en el proyecto C, presentándose un aumento no significativo en el factor de planta y un leve incremento en el valor debido a la venta bajo un precio superior. Queda entonces evidenciada la robustez de la metodología planteada pues al valorar plantas que comparten la misma tecnología, con equivalente grado de flexibilidad (casi nulo) se presenta la misma reacción en referencia a los resultados por flujo de caja descontado.

## 4. Conclusiones

- La valoración de activos es un pilar fundamental de la teoría financiera moderna y es continuamente objeto de investigación con el fin de lograr capturar de manera insesgada el valor real del activo de interés. La valoración por flujo de caja descontado representa la técnica de valoración más intuitiva y es considerada la base sobre la cual las demás técnicas son desarrolladas, aun así en el sector eléctrico queda evidenciada la falencia presente en esta técnica de asignar valor a ciertas flexibilidades propias de los proyectos de generación
- La valoración contingente, puntualmente las opciones reales, son una alternativa adecuada como técnica de valoración para proyectos de generación eléctrica debido a la naturaleza incierta de este tipo de inversiones y a la presencia e flujos de caja contingentes que se dan únicamente bajo ciertos eventos. Se muestra que así como esta técnica permite asignar valor a ciertas opciones presentes en los proyectos no es trivial su desarrollo, dejando diferentes aspectos al criterio del modelador y asimismo su extensión entre las diferentes flexibilidades no es sencilla.
- Se verifica lo demostrado en la literatura, ajustando satisfactoriamente un proceso de reversión a la media para el precio en bolsa diario de la energía, adicionalmente se demuestra la necesidad de utilizar un modelo de volatilidad condicionada para cada mes del año, donde el modelo más adecuado en todos los casos fue el GARCH(1,1).
- Se implementó la metodología propuesta con el fin de cuantificar el valor adicional que ofrece la flexibilidad operativa presente en los motores reciprocantes (proyecto A) como tecnología de generación. Esta flexibilidad, reflejada en su corta rampa de arranque aumenta el valor total del proyecto en un 26%, ocasionado por un incremento en su factor de despacho de 2.3 veces su valor original según el SDDP. Se concluye que la flexibilidad presente en el proyecto tiene un valor de \$105.626 millones.
- La valoración de otros proyectos de generación donde las plantas no presentaban la flexibilidad operativa, dejó en evidencia la robustez de la metodología. Resultando en cambios no significativos tanto para el factor de planta como para su valor total en referencia a los mismos valores calculados mediante la técnica de flujo de caja convencional.

## 5. Trabajo futuro

- En la sección 2.1 se definieron las diferentes flexibilidades de interés a valorar por medio de la herramienta de opciones reales, asimismo a lo largo del trabajo quedo definida a cabalidad la metodología de valoración propuesta para la flexibilidad operativa. Aun así, debido a la dificultad presente en la extensión de la metodología de valoración entre las diferentes flexibilidades y la restricción de tiempo presente, no fue posible cumplir la totalidad del alcance propuesto en esta investigación al no valorar las demás flexibilidades planteadas. Queda entonces propuesto como trabajo futuro el desarrollo de metodologías de valoración para las flexibilidades: comercial y de inversión y otras flexibilidades que en su momento sean consideradas de interés por los autores.
- La metodología de valoración planteada parte de un supuesto de generación. Este establece que en caso de ejercerse la opción, es decir, en caso de que el precio en bolsa de la energía supere el costo variable de generación, la planta genera su máxima energía disponible en ese periodo. Con el fin de refinar aún más la valoración, se puede desarrollar una metodología donde este supuesto sea suavizado, en caso de no lograrlo se debe migrar a otras metodologías como los sistemas de despacho centralizados con el fin de lograr simular el despacho real de cada planta.
- Profundizar en el análisis de una posible reducción en la tasa de descuento utilizada en la metodología de opciones reales frente a la implementada en la técnica flujo de caja descontado tradicional, siendo esta motivada por el escenario de incertidumbre reducida en el cual se generan los flujos de caja contingentes, donde ya se tiene en cuenta la volatilidad inherente al precio de venta y por tanto debe ocasionar una disminución en la tasa de descuento para el cálculo del valor presente.
- Extender la metodología de valoración propuesta a otros mercados internacionales, de este modo se hace necesaria la modelación de los precios de bolsa de la energía en el mercado de interés.

## Referencias

- Barrientos, J., Rodas, E., Velilla, E., Lopera, M., & Villada, F. (2012). Modelo para el pronóstico del precio de la energía eléctrica en Colombia. *Lecturas de Economía*, 77, 91-127.
- Benninga, S. (2008). *Financial modeling*. MIT Press Books, vol. 1.
- Caporal, A., & Brandão, L. (2008). Valuation of a power plant with the real options approach. *Brazilian Business Review*. 5(2), 103-120.
- Cartea, A., & Figueroa, M. (2005). Pricing in electricity markets: a mean reverting jump diffusion model with seasonality. *Applied Mathematical Finance*. 12(4), 313-335.
- Contreras, J., & Muñoz J., (2009). Valoración del riesgo de las inversiones en proyectos de generación eólica mediante opciones reales. *Universidad de Castilla*, 25(44), 193-231.
- Damodaran, A. (1999). The promise and peril of real options. *New York University*, 1–75.
- Damodaran, A. (2012). *Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset*. John Wiley & Sons.
- Diaz-Hoyos, G. (2008). A Spot Price's Model for Electricity in the Colombian Market Using Markov Chains and Mean Reversion-An Approach for Including the ENSO Effects on Prices. Available at SSRN 1584880.
- Fernández, P. (2008). Métodos de valoración de empresas. PricewaterhouseCoopers Professor of Corporate Finance. (pp. 48). Madrid. IESE Business School.
- Fraye, J., & Uludere, N. (2001). What is it worth? Application of real options theory to the valuation of generation assets. *The Electricity Journal*. 14(8), 40-51.
- Geman, H. (2007). Mean reversion versus random walk in oil and natural gas prices. *Advances in Mathematical Finance*, (pp. 219-228). Birkhäuser Boston.
- Gil, M. M., & Maya, C. (2008). Modelación de la volatilidad de los precios de la energía eléctrica en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 87-114.
- Luehrman, T. (1997). What's it worth. *Harvard Business Review*, 75(4), 132-142.
- Osorio, S. (2002). Análisis de oportunidades de inversión privada en el sector eléctrico colombiano, con énfasis en el manejo de riesgo e incertidumbre. Universidad Nacional de Colombia.
- Schwartz, E. (1997). The stochastic behavior of commodity prices: Implications for valuation and hedging. *The Journal of Finance*, 52(3), 923-973.
- Sharpe, W. (1964). Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk. *The Journal of Finance*, 19(3), 425-442.