

# Valoración de opciones sobre el precio de la energía eléctrica mediante simulación de Montecarlo – difusión por saltos

(Dic 2014)

Autor: Castiblanco Velosa Julieth Andrea, León Acosta Paola Andrea Tutores: Ariza Miller

**Resumen** - En esta propuesta se realizó una comparación financiera de 3 modalidades de opciones (opción clásica europea con volatilidad constante, opción clásica europea con volatilidad Garch y opción asiática) para determinar cuál es el instrumento de cobertura más apropiado para los inversionistas en el mercado de energía eléctrica; se realizan los pronósticos de volatilidad estocástica mediante un modelo GARCH, los pronósticos del precio Strike mediante difusión por saltos y los pronósticos del precio Spot mediante simulación de Montecarlo, por lo anterior se elige a las opciones asiáticas como el instrumento de cobertura más óptimo, que permite generar una mayor certeza en comparación a las opciones evaluadas sobre los precios futuros.

## **Palabras clave**

Esperanza condicional  
Esperanza marginal  
Mercado OTC  
Opciones asiáticas  
Opciones exóticas  
Opción Promedio strike  
Backtesting

**Abstract**— In this proposal the financial comparison of three financing options (European classic choice with constant volatility, option volatility classic European and Asian Garch option) to determine the most appropriate hedging instrument for investors of electricity was made; stochastic volatility forecasts using a GARCH model are performed, price forecasts Strike by diffusion by leaps and price forecasts Spot by Monte Carlo simulation, so before the Asian options is chosen as the optimal hedging instrument that can generate greater certainty compared to the options evaluated on future prices.

## **Key Words**

Conditional expectation  
Marginal expectation  
Stochastic  
Over the counter Market  
Asian Option  
Exotic options  
Montecarlo Simulation  
Volatility  
Average strike rate options  
Backtesting

## **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente el desarrollo y dinamismo de los mercados financieros presentan la necesidad de buscar alternativas eficientes de valoración con el objetivo de disminuir el impacto de la volatilidad en los precios futuros de un activo subyacente en el largo plazo, dado el alto nivel de incertidumbre en los precios del mercado energético colombiano. Las características propias del producto, el tipo de mercado en el que se transan. Por tanto la importancia de analizar distintas herramientas y metodologías de valoración que le proporcionan al inversionista estimaciones aproximadas, así mismo se comparan los resultados de las estimaciones calculadas para la valoración de opciones europeas y asiáticas y de esta manera establecer la mejor alternativa de cubrimiento a través de opciones para el mercado colombiano.

Es por lo anterior, que se realiza una comparación entre algunos métodos de valoración de opciones europeas y opciones asiáticas, teniendo en cuenta su aplicación en el contexto del mercado energético colombiano. Para esto, se describe las características de las opciones europeas y asiáticas, junto con los distintos métodos para su valoración, a partir del método de simulación de Montecarlo; se comparan los resultados de la valoración de las distintas opciones, se

establece la mejor estrategia de cobertura tomando como referencia las características del mercado.

Las opciones valoradas en el presente trabajo son opciones en las cuales su valor depende de la evolución histórica de los precios del subyacente por tanto reflejaran el comportamiento real se la serie de precios de energía, de acuerdo a los resultados obtenidos en la estimación de las tres alternativas de cubrimiento se determinó las opciones asiáticas como la metodología que presenta mejor cobertura.

Este documento se presenta en cuatro secciones principales; En la primera parte se revisa la historia e importancia de la energía eléctrica en Colombia y el marco teórico de acuerdo a la estructura del trabajo las opciones europeas asiáticas, sus características y valoración, en la segunda parte se muestran los resultados de las estimaciones econométricas, en la tercera parte se presentan los resultados de las simulaciones de Montecarlo, al final se establecen conclusiones.

## 2. MARCO REFERENCIAL

El tema central de este documento radica en valorar el precio de la energía eléctrica y analizar su alta volatilidad en el mercado colombiano, definir la mejor estrategia de cubrimiento para contrarrestar los movimientos futuros del precio de energía, sin embargo es importante mencionar que la literatura actual no contempla investigaciones nacionales debido a que el mercado energético se encuentra en constante desarrollo, por tanto se ha incrementado la necesidad de realizar investigaciones empíricas en el desarrollo de herramientas de gestión de riesgo usando distintas alternativas para su valoración, entre ellas se destacan las siguientes investigaciones:

La universidad del país vasco bajo el programa de investigaciones europeas de dirección y economía presento en el 2001 un documento, “análisis de la valoración de las opciones asiáticas utilizadas por los fondos de inversión garantizados de renta variable, en el que se valoran opciones asiáticas para los fondos de inversión mobiliaria, con metodología de Montecarlo, método aproximado de vorst, método aproximado de levy, método aproximado de turnbull y wakeman”. (Vasco, 2001)

La universidad autónoma de Bucaramanga, bajo el programa de Economía en enero de 2014 presento un artículo, “Estrategia de cobertura con productos derivados para el mercado energético colombiano, modelando la volatilidad mediante modelos econométricos ARCH –GARCH”, además, diseñaron una opción exótica tipo barrera calculando las primas a partir del modelo Black – Scholes (Bucaramanga, 2014).

En diciembre de 2011 la universidad EAFIT público: “los precios forward sobre la electricidad ¿determinados racionalmente por los agentes del mercado colombiano?”, concluyeron que los contratos forward no son estandarizados ni líquidos, determinando que los precios forward son dados racionalmente por el mercado, así mismo se evalúa el comportamiento de la prima de riesgo. (EAFIT, 2011)

La escuela de ingeniería de Antioquia en el 2009 publico: “Aplicación de los modelos GARCH a la estimación del VaR de Acciones colombianas como Suramericana de Inversiones, Compañía nacional de chocolates, Bancolombia, Banco Bogotá Fabricato e Inverargos”, concluyendo que el valor del VaR es menor por la metodología RiskMetric que por los modelos GARCH, sin embargo no se realizaron pruebas Backstesting (Antioquia, 2009).

La universidad autónoma de Bucaramanga en el programa de Ingeniería Financiera público: “Análisis y valoración del riesgo de precio de energía eléctrica en Colombia, evaluando la volatilidad con modelos econométricos ARCH –GARCH”, determinando el modelo ARCH como el más apropiado por que no emplea procesos autoregresivos (Bucaramanga, 2014).

La universidad tecnológica de Pereira en la maestría en ingeniería eléctrica publico una “estrategia de mitigación del riesgo para productores de energía eléctrica en el mercado colombiano”, dicha estrategia se basa en la predicción de una red neuronal, maximizando el retorno y minimizando el error de predicción basado en el modelo de markowitz, mitigando la exposición con la creación de un forward (Pereira, 2013).

Las anteriores investigaciones no contemplan el uso de opciones asiáticas en el mercado colombiano para valorar el riesgo del precio de la energía eléctrica, la literatura estudiada solo contempla los contratos forward para mitigar el riesgo en dicho mercado, sin

embargo el estudio de dichos documentos son un referente teórico del presente trabajo, ya que la problemática evidenciada se presenta como referente conceptual para una apropiada contextualización y análisis de las distintas metodologías de cobertura en los mercados; por tanto este documento es el primer desarrollo empírico que abarca el estudio de los precios de la energía y el comportamiento de su alta volatilidad en el mercado colombiano, por lo cual es pertinente encontrar una metodología que asegure un precio a largo plazo evitando una exposición ante posibles variaciones de las cotizaciones.

## 2.1 SISTEMA DE VALORACIÓN DE PRECIOS

El presente apartado pretende darle al lector un referente del sistema de valoración del precio de la energía, su proceso, metodología y las tendencias actuales para gestionar el riesgo en el mercado energético colombiano.

El servicio de la generación de energía permite la participación de agentes económicos, públicos y privados, los cuales deben estar integrados al sistema interconectado para participar en el mercado energético mayorista (MEM), como contraparte comercializadores y grandes consumidores actúan celebrando contrato de energía eléctrica con los generadores; quienes sin los que desarrollan la actividad de producción de electricidad, energía que puede ser transada mediante la bolsa de energía o mediante contratos bilaterales.

Los generadores presentan diariamente las ofertas de precio a la bolsa y su declaración de disponibilidad, de los cuales el Centro nacional de despacho o sus siglas CND, deberá elaborar el despacho económico para las 24 horas del día siguiente, por consiguiente los generadores reciben un ingreso adicional proveniente del cargo por capacidad este dependerá de la disponibilidad real.

El precio de la electricidad en este mercado se establece de común acuerdo entre las partes contratantes, el precio puede estar determinado por el precio spot más o menos una prima, un promedio de las negociaciones del mercado y una prima determinada, o la suma de los costos variables de la generación, las compras de energía efectuadas por comercializadores con destino a usuarios regulados de realiza mediante la suscripción de un contrato regulado, si el destino de la compra es para usuarios no regulados, mediante un

contrato bilateral no regulado cuyas condiciones se pactan libremente.

Entendiéndose como usuarios regulados los cuales cumplen las normas establecidas por los entes de regulación. Los contratos bilaterales entre generadores y comercializadores se deben registrar ante el ASIC Administrador Del Sistema De Intercambio Comerciales con 5 días previos a la entrega de la operación, con el objetivo de realizar una revisión de las condiciones de los contratos el cumplimiento de los requisitos para determinar las cantidades el precio negociado, la liquidación y determinar el balance de las transacciones en el mercado spot.

Las transacciones realizadas directamente en la bolsa deben presentar ofertas de precio en la bolsa de energía, su precio debe reflejar el costo variable de la generación más un componente de riesgo, “el precio de bolsa corresponderá al precio de oferta del recurso marginal no inflexible que se obtiene del despacho ideal, por tanto este es el precio utilizado para valorar los intercambios de bolsa” (UPME, 2004)

Actualmente esta actividad de contratos para cobertura se realiza mediante subastas para compra y venta de energía, las subastas pueden estar dadas por dos métodos de asignación, el primero por subasta multiproducto de precio uniforme, en el que se establece el precio máximo de las ofertas y se venden la energía al precio máximo y el segundo por subasta multiproducto de precio discriminante, asigna el precio que cada generador ofrezca con la cantidad correspondiente a la demanda programada.

“El mercado OTC permite tener una mayor flexibilidad en determinar las condiciones pactadas para la negociación, por tanto se evidencia contratos forward no estandarizados u opciones exóticas”. (XM, Funcionamiento del mercado OTC de contratos forward de electricidad en colombiana, 2008), lo que infiere la necesidad de los inversionistas en buscar nuevas alternativas que incrementen el dinamismo del mercado con la finalidad de disminuir el impacto de la volatilidad, obtener señales u aproximaciones para determinar los precios futuros, mediante el uso de contratos u opciones de tipo exótico.

## MODALIDADES DE MERCADO: MERCADOS OTC Y MERCADOS ORGANIZADOS.

Los mercados organizados utilizan mecanismos de subasta para el establecimiento de los precios, mientras que en los mercados OTC el precio se establece por negociación entre comprador y vendedor. Los mercados OTC proporcionan una mejor cobertura ya que es medida, aunque el comprador debe asumir el riesgo de contrapartida.

En general es más seguro, fácil y rápido tomar y cerrar posiciones en los mercados organizados, aunque los costes de transacción (financiación de márgenes y comisiones) pueden ser mayores. Estas características hacen que los instrumentos OTC sean más utilizados en la cobertura de operaciones específicas, mientras que las opciones de mercado organizado son más demandadas para coberturas globales (por ejemplo, sobre el balance total de una empresa), arbitraje y especulación.

### 2.2 OPCIONES

La estrategia planteada en este documento para cubrir la alta volatilidad de los precios de la energía, está dado por el uso de las opciones, por tanto es necesario conocer el componente teórico de estas sus principales características y ventajas.

Una opción la podemos definir como un contrato que da derecho a su poseedor a vender o comprar un activo a un precio determinado durante un periodo o en una fecha prefijada. Los contratos de opción son una de las piezas fundamentales de un mercado financiero moderno. La idea entre los inversores y profesionales es que las opciones tienen una corta vida y que constituyen uno de los elementos más representativos del proceso de innovación financiera, las opciones se asocian con las reformas de los mercados de valores, su negociación es un síntoma de la modernización de los respectivos mercados.

#### 2.2.1. ANTECEDENTES DE LAS OPCIONES

Las opciones son una parte fundamental de la evolución del mercado financiero, su negociación valoración se remonta en la época de los fenicios, los griegos y los romanos negociaban contratos con cláusulas de opción sobre las mercancías que transportaban en sus naves. Por ejemplo, (KARTZ, 1990) describió la anécdota de la importante ganancia que obtuvo el famoso filósofo,

matemático y astrónomo griego Thales invirtiendo en opciones sobre aceitunas basándose en una previsión acertada de la cosecha, así mismo a principio del siglo XVIII, en Inglaterra comenzaron a negociarse opciones sobre acciones de las principales compañías comerciales. El escándalo provocado por la fuerte caída de precios de la South Sea Company en 1720, atribuido en parte a la especulación con opciones sobre acciones de esta compañía, provocó que el mercado de opciones fuese declarado ilegal. Esta prohibición estuvo vigente hasta el inicio del siglo XX, aunque se siguieron haciendo operaciones sobre opciones de forma semiclandestina. (Lamothe Fernández, 2003)

“El banco Trust de Tokio fue la primera institución financiera que ofreció las opciones asiáticas” como metodología para distorsionar o suavizar los cambios volátiles en el precio de la opción sobre todo al acercarse su fecha de vencimiento, “por tanto este tipo de opciones a tenido un auge en el ámbito financiero en los últimos años” (Metropolitana-Iztapalapa)

Actualmente las opciones son equivalentes a metodologías de innovación financiera que permiten con base en la historia diseñar nuevas estrategias de modernización en los respectivos mercados.

#### 2.2.2. OPCIONES EXÓTICAS

El siguiente apartado define las principales características de las opciones exóticas ya que estas pueden adaptarse a las necesidades del mercado, del rendimiento exigido sus ventajas y desventajas en cada modalidad en especial de tipo asiático, con el objetivo de realizar una comparación con estas opciones y las tradicionales.

Se denominan opciones exóticas a todas las opciones no tradicionales, entendiendo por tradicionales las opciones que tienen precio de ejercicio fijo y cuyo valor depende del precio del subyacente en la fecha de ejercicio. Generalizando, se suele denominar opciones exóticas a todas aquellas cuyo valor en la fecha de ejercicio no es el de una call ni el de una put tradicionales: ni  $MAX(0; S_t - K)$  ni  $MAX(0; K - S_t)$ .<sup>1</sup>

<sup>1</sup>  $S_t$ : precio del activo subyacente  $K$ : precio strike o precio del ejercicio  
Call: opción que da el derecho pero no la obligación de comprar un subyacente a un precio determinado en un fecha previamente pactada.  
Put: opción que da el derecho pero no la obligación de vender un subyacente a un precio determinado en un fecha previamente pactada.

El precio de la energía eléctrica de bolsa es variable y altamente volátil, pues depende de varios fundamentales como las condiciones climáticas, la hidrología, la demanda y su disponibilidad, Mediante los derivados financieros se pretende diseñar una cobertura que permita generar una aproximación a la tendencia sobre los precios futuros, las perspectivas de inversión y crecimiento para dicho mercado. Por lo anterior, las opciones que estudiamos en el presente trabajo son opciones en las cuales su valor depende de la evolución histórica de los precios del subyacente, por tanto reflejan el comportamiento real de la serie.

**Tipos Opciones Exóticas**

OPCIONES	DEFINICIÓN	CARACTERISTICAS
<b>LOOKBACK</b>	El valor del precio de ejercicio se determina teniendo en cuenta el precio más favorable del subyacente durante la vida de la opción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para el poseedor de una call será el precio más bajo alcanzado (sus pagos son la diferencia entre el precio de mercado en el vencimiento, y ese precio de ejercicio). Para el comprador de una put será la cotización más alta (sus pagos son la diferencia entre ese precio de ejercicio y el de mercado en el vencimiento)</li> <li>- El poseedor de una opción de este tipo puede escoger el precio de ejercicio según más le convenga, la prima que tiene que pagar por ella es mucho más elevada que la de una opción estándar.</li> </ul>
<b>PARISINAS</b>	Son opciones cuyo valor depende del periodo de tiempo que el precio del activo subyacente esté arriba o abajo del precio strike.	Es una opción con barrera pero con una característica adicional que es el lapso de tiempo durante la cual el precio del subyacente deberá estar por encima o debajo de una barrera. Se observa que estas opciones son más restrictivas que las opciones con barrera, esto hace

		que la opción parisina sea más barata que la opción con barrera con parámetros similares.
<b>BARRERA</b>	Son opciones que adquieren vigencia o la pierden según que el precio del activo subyacente alcance un determinado valor H (nivel de la barrera) durante la vida de la opción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ofrece una excelente alternativa para cubrir riesgos en niveles críticos de precios ya que resultan más baratas que las opciones tradicionales</li> <li>- Pueden ser de gran utilidad en la cobertura de variaciones en los precios de mercancías y de posiciones en divisas.</li> </ul>
<b>DOBLE BARRERA</b>	Son muy similares a las opciones barrera, la única diferencia es que el valor final de la opción dependerá de si el subyacente toca (o no) una barrera superior (U) y otra barrera inferior (L).	- Una opción de doble barrera es más barata que una opción barrera debido a que la opción doble barrera tiene dos precios de activación cualquiera de ellos puede sacar a la opción fuera de existencia
<b>ASIATICAS</b>	El valor final de este tipo de opciones se obtiene por la media aritmética o geométrica de los precios del subyacente en un periodo previo estipulado antes del vencimiento de la opción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduce las posibilidades de manipulación del precio del subyacente en la fecha de vencimiento.</li> <li>- Como un precio medio es menos volátil que las series de precios empleadas para calcularlo, el precio de una opción asiática es menor que el de las opciones estándar.</li> </ul>

(Lamothe & Pérez, Opciones Financieras y Productos Estructurados, 2003)

En particular las opciones asiáticas, que son la propuesta de este trabajo tiene numerosas ventajas para diversas situaciones caracterizadas por su regularidad en el tiempo, como por ejemplo: “situaciones de aprovisionamiento periódico de materias primas y otros suministros y a operaciones de

importación y exportación que tengan esa misma característica de regularidad temporal” (Lamothe & Pérez, Opciones Financieras y Productos Estructurados, 2003). En cuanto a que el coste de las primas sea menor que el de las opciones tradicionales se debe a que en las opciones tradicionales para valorarlas hay que tener en cuenta la volatilidad del activo sobre el que está hecha la opción, en las opciones asiáticas la volatilidad a tener en cuenta será la media de los valores que alcance el activo subyacente de la opción a lo largo de la vida de la opción, esta volatilidad de la media siempre será inferior a la volatilidad del activo.

Estas opciones se diseñaron para hacer más suave la función de pago, pues al depender esta del promedio del precio más que del precio terminal se evitan oscilaciones amplias en el precio cerca de la maduración, esta propiedad las hace interesante para los reguladores e inversores.

### 2.2.3 OPCIONES EUROPEAS

As mismo se evalúan las opciones europeas que se negocian a través de bolsas o sistemas de negociación de valores deben valorarse siempre sobre la base del correspondiente precio de mercado en la fecha de valoración. Tales precios son provistos por la respectiva bolsa o sistema de negociación de valores donde la entidad vigilada haya negociado el instrumento financiero derivado, proporcionan al inversor, el derecho mas no la obligación de comprar o vender un activo subyacente en un precio strike a un plazo determinado pagando una prima call o put; estas opciones solamente pueden ser ejercidas en la fecha de vencimiento la cual es previamente acordada por las partes.

Para poder valorar las opciones europeas, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: el Strike que es el precio de ejercicio, la volatilidad del activo subyacente, una tasa libre de riesgo, el spot que es el precio de mercado conocido del activo y el tiempo en el que expira la opción.

### 2.2.4 MODELO BLACK & SCHOLES

El modelo de Black & Scholes de 1973, es el modelo más utilizado en la valoración de opciones, es necesario mencionar que este modelo es exclusivamente para valorar opciones europeas, con este, se calcula su precio o prima.

“Para generar la formula, es necesario partir de las siguientes condiciones iniciales”: (Navarra, )

- i. En el corto tiempo, la tasa de interés es conocida y constante a través del tiempo.
- ii. El precio del activo, sigue una caminata aleatoria en tiempo continuo con una varianza condicionada al cuadrado del precio del activo. Así, la distribución de los posibles precios del activo al final de cualquier intervalo finito es log-normal.
- iii. La varianza de los retornos del activo es constante.
- iv. El activo no paga dividendos.
- v. La opción es europea, lo que significa que solo puede ser ejercida en el vencimiento.
- vi. No hay costos de transacción en la compra o venta del activo o la opción.
- vii. Es posible pedir prestada cualquier fracción del precio para asegurarlo o mantenerlo, a una tasa de interés en el corto plazo.
- viii. No hay penalizaciones por la venta en corto.

La fórmula empleada para estimar el valor actual de una opción call o put europea en una fecha futura es:

$$Call = SN(d_i) - Kr^{-T} N(d_i - \sigma \bar{t})$$

$$Put = Kr^{-T} N(d_z) + \sigma \bar{t} - SN(d_z)$$

Donde,

$$d_i = \frac{\ln \frac{S}{K} + r - \frac{\sigma^2}{2}}{\sigma \sqrt{T}} + \sigma \frac{\bar{t}}{2}$$

$$d_z = \frac{\ln \frac{K}{S} + r - \frac{\sigma^2}{2}}{\sigma \sqrt{T}} - \sigma \frac{\bar{t}}{2}$$

S: Es el precio del activo subyacente o spot

K: Strike o precio de ejercicio

r: 1+ tasa libre de riesgo

$\sigma$ : Volatilidad Anual

N: Valor de la función de probabilidad acumulada de la distribución normal

T: Periodo de vigencia de la opción

### 2.2.5 OPCIONES ASIATICAS

La valoración de este tipo de opciones se puede obtener por la media aritmética (o geométrica) de los precios del subyacente en un periodo previo estipulado antes del vencimiento de la opción. Generalmente, la media

se calcula en base a los precios diarios de cierre del subyacente. En los mercados OTC es muy común que el plazo para el cálculo comience en el momento en que se crea la opción y finalice a su vencimiento, aunque no existe ningún inconveniente técnico en utilizar otra convención (por ejemplo, el precio medio del mes, trimestre, etc.)

“Las opciones asiáticas más negociadas son las que al vencimiento ofrecen una remuneración igual a la diferencia, si es positiva, entre el precio medio del activo subyacente durante el periodo predeterminado y el precio de ejercicio, se les denominan opciones de precio del subyacente promedio (OSP) (average rate options) o asiáticas” (Lamothe Fernández, 2003).

Por otro lado, también se negocian opciones que al vencimiento ofrecen una remuneración igual a la diferencia, si es positiva, entre el precio del activo subyacente en la fecha de vencimiento de la opción y la media de los precios que el activo subyacente ha alcanzado durante el periodo temporal especificado. A estas se les denomina opciones de precio de ejercicio promedio (OEP) (average strike options) o pseudo-asiáticas.

El payoff<sup>2</sup> de una opción call asiática es:  $\max(\text{Spot}^* - K, 0)$  en la fecha de vencimiento, el de una opción put asiática es:  $\max(K - \text{Spot}^*, 0)$  en la fecha de vencimiento, donde el  $\text{Spot}^*$  es la media aritmética o geométrica de los precios observados del activo subyacente desde que compramos la opción hasta la fecha de vencimiento o desde una fecha determinada hasta la fecha de vencimiento. (Fernandez & Angel Ariño, 1996)

La finalidad fundamental de este tipo de opciones es reducir las posibilidades de manipulación del precio del subyacente en la fecha de vencimiento. También, algunos inversores las consideran útiles cuando su política de compras (o ventas) les obliga a realizar transacciones frecuentes sobre un mismo activo en un horizonte temporal determinado. Frente a la alternativa de comprar <sup>n</sup> opciones a diferentes vencimientos, resulta más barato comprar una opción asiática con vencimiento al final del periodo, logrando un nivel similar de cobertura de riesgos.

Para la valoración, lo más usado son los métodos numéricos, entre estos montecarlo o arboles binomiales, ya que si contamos con las sendas de evolución del activo subyacente es muy sencillo calcular la media de los precios observados y por lo tanto la prima de la opción, el método de simulación de montecarlo permite evaluar distintos tipos de activos subyacente y determinar de forma simultánea el valor del subyacente, generado por muestras aleatorias del comportamiento dinámico de los parámetros establecidos, sin embargo cabe resaltar que una óptima estimación de la evolución del precio de la opción requiere de la generación de un gran número de trayectorias determinadas por las características propias del activo o decisión del experto.

Para el caso de valoración de opciones asiáticas con media geométrica se calcula la media geométrica de los precios del activo subyacente. Si el activo subyacente se asume que se distribuye de forma lognormal, le media geométrica del activo subyacente también se distribuye de forma lognormal. “El modelo analítico de valoración para opciones asiáticas con media geométrica es el de Kemma y Vorst (1990). La prima de la opción se puede calcular haciendo unos cambios sencillos en el modelo de Black- Scholes”. (Lamothe Fernández, 2003)

Se cambia la volatilidad por

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{3} \quad y \quad r - q \quad por \quad b_a = \frac{1}{2} \quad r - q \quad - \frac{\sigma}{6}$$

$$call = S e^{b_a - r T} N(d_1) - K e^{-rT} N(d_2)$$

$$put = K e^{-rT} N(d_2) - S e^{b_a - r T} N(d_1)$$

$$\text{Donde } d_1 = \frac{\ln \frac{S}{E} + (b_a + \sigma_a^2/2)T}{\sigma_a \sqrt{T}}; \quad d_2 = d_1 - \sigma_a \sqrt{T}$$

S: Es el precio del activo subyacente

K: Strike o precio de ejercicio

r: Tipo de interés libre de riesgo

q: Dividendos del activo subyacente

T: Tiempo a vencimiento de la opción.

En el caso de determinar el precio de la opción con media aritmética se calcula mediante la media de los precios del activo subyacente desde una fecha determinada hasta el vencimiento. Para la valoración de este tipo de opciones no existe un modelo analítico cerrado. El motivo es que se supone que el activo subyacente se distribuye de forma lognormal y la media

<sup>2</sup> Payoff – Se define como el valor de la opción al vencimiento sin incluir el valor de la prima.

aritmética del activo subyacente no sigue esa distribución.

Existen varias aproximaciones analíticas, como la de Turnbull y Wakeman (1991) o Levy (1992). No siempre podemos recurrir a métodos numéricos como Montecarlo. (Lamothe Fernández, 2003), dependiendo de las características de la serie su distribución o supuestos adoptados para la valoración.

El modelo de Levy (1992):

$$S_E = \frac{S}{T} \frac{e^{-qT_2} - e^{-rT_2}}{r - q}, \quad d_1 = \frac{1}{\sqrt{V}} \frac{\ln(D)}{2} - \ln(E^*), \quad d_2 = d_1 - \sqrt{V}$$

$$K^* = K - \frac{T - T_2}{T} S_A, \quad V = \ln D - 2rT_2 + \ln S_E, \quad D = \frac{M}{T^2}$$

$$M = \frac{2S^2}{(r - q)\sigma^2} \frac{e^{(2r - q + \sigma^2)T_2} - 1}{2r - q + \sigma^2} - \frac{e^{(r - q)T_2} - 1}{r - q}$$

$$call \approx S_E N(d_1) - E^* e^{rT_2} N(d_2)$$

Calculamos la prima de la put mediante la paridad put-call para opciones asiáticas:

$$put \approx call - S_E + E^* e^{-rT_2}$$

Dónde:

$S_A$ : Es la media aritmética del activo subyacente

$S$ : Es el precio del activo subyacente

$k$ : Strike o precio de ejercicio

$r$ : Tipo de interés libre de riesgo

$q$ : Dividendos del activo subyacente

$T_2$ : Tiempo en años sobre el que se calcula la media aritmética del subyacente.

$T$ : Tiempo a vencimiento de la opción.

## 2. 2.6 EL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE MONTECARLO

En El siguiente apartado se define el concepto características y metodología de montecarlo para valorar opciones; El método de simulación de Montecarlo es un método de simulación numérica que se suele utilizar cuando para la valoración de opciones no existen fórmulas cerradas; Esta metodología fue introducida por Boyle en 1977. Se puede utilizar para la

valoración de la gran mayoría de las opciones de tipo europeo y para múltiples modalidades de opciones exóticas.

El método de Montecarlo se utiliza para simular un rango muy grande de procesos estocásticos. La valoración de las opciones se realiza descontando el valor de la opción a la tasa libre de riesgo. La hipótesis de partida del modelo es que el logaritmo natural del activo subyacente sigue un proceso geométrico Browniano, de forma que tendríamos:

$$S + dS = S * \exp \left( \mu - \frac{1\sigma^2}{2} dt + \sigma dz \right)$$

Donde  $S$  es el nivel del activo subyacente,  $\mu$  es la tasa de retorno esperada del activo subyacente,  $\sigma$  es la volatilidad del subyacente y  $dz$  es un proceso de Wiener con desviación típica 1 y media 0 (Arregui Ayastuy & Vallejo Alonso).

El número de simulaciones dependerá del nivel de exactitud que queramos obtener con el modelo. Normalmente a partir de 10.000 simulaciones los resultados obtenidos son fiables. El principal inconveniente de la simulación es el elevado coste computacional, es decir, el tiempo en el que el ordenador ejecuta la simulación.

Valorar opciones asiáticas mediante montecarlo consiste esencialmente en un muestreo artificial o simulado; es decir, en generar números aleatorios y en convertirlos luego en observaciones de la variable aleatoria del modelo.

El inconveniente fundamental del método de Montecarlo es que el resultado obtenido no es exacto sino una aproximación, por lo que siempre se comete un error al utilizar la estimación. El error cometido se puede disminuir incrementando el número de simulaciones generadas para estimar el valor de la opción, pero esto provoca el aumento del tiempo necesario.

Cabe resaltar que el caso de las opciones asiáticas, se puede disminuir utilizando la técnica de reducción de varianza propuesta por Kemna y Vorst (1990). En su trabajo ponen de manifiesto el alto grado de correlación entre opciones asiáticas aritméticas y geométricas. Este hecho se aprovecha para incrementar la precisión de las estimaciones obtenidas y así reducir el intervalo de confianza de la estimación de Montecarlo a



proporciones satisfactorias, utilizando la ventaja que supone el hecho de que el valor de una opción asiática geométrica puede calcularse con total precisión a través de métodos analíticos. (Arregui Ayastuy & Vallejo Alonso)

### 2.3 VOLATILIDAD ESTOCÁSTICA

Uno de los factores que alteran el valor de la opción es la volatilidad por tanto es objeto de estudio en el presente trabajo; La volatilidad es uno de los principales elementos que influyen en la evolución de los mercados financieros, puesto que a través de ella se puede estimar y medir los cambios que no se pueden predecir y que se producen en la rentabilidad de un activo financiero, al igual se puede determinar el riesgo financiero del mercado o el valor de compra o venta de opciones.

La volatilidad puede ser de dos tipos determinista o estocástica; en cuanto a la volatilidad determinista se utiliza como estimación la desviación típica de la serie de rentabilidades, en cuanto a la volatilidad estocástica se utiliza modelos de heterocedasticidad condicional autorregresiva o modelo autorregresivo integrado de media móvil, entre muchos otros.

#### 2.3.1 MODELOS ARCH Y GARCH

Con el objetivo de comparar y establecer diferencias entre los dos tipos de volatilidad la determinista y la estocástica para dicho trabajo de investigación, se pretende valorar la volatilidad del precio de la energía mediante modelos ARCH Y GARCH evaluando que metodología se ajusta con más precisión al comportamiento de la energía.

Los modelos del tipo lineal de series de tiempo tales como ARIMA (p, d, q) o los modelos causales de regresión lineal, no son los más adecuados para analizar y predecir adecuadamente un proceso real. Por lo anterior, se han desarrollado modelos no lineales con la finalidad de desarrollar métodos de estimación apropiados para la serie a valorar.

Un proceso estocástico es estacionario cuando se cumplieran las siguientes condiciones:

1.  $E Y_t = \mu$
2.  $\text{Var } Y_t = E(Y_t - \mu)^2 = \sigma^2$
3.  $\text{Cov } Y_t; Y_{t-j} = \text{Cov}(Y_{t+m}; Y_{t+m-j})$

En el caso del ruido blanco que es un caso particular de este tipo de proceso, se cumplen las siguientes tres condiciones:

1.  $E \varepsilon_t = 0$
2.  $\text{Var } \varepsilon_t = E(\varepsilon_t - 0)^2 = \sigma^2$
3.  $\text{Cov } \varepsilon_t; \varepsilon_{t-j} = 0$

#### Modelo ARCH (q) GARCH (p, q)

Los modelos ARCH tiene su origen en un artículo de ENGLE (1982), en este intentaba predecir la inflación en el Reino Unido, el proceso viene definido por la siguiente expresión (ARCE, 1998):

$$Y_t = \varepsilon_t \sigma_t$$

$$\sigma_t^2 = w + \sum_{i=1}^q a_i y_{t-1}^2$$

Donde se presentan las siguientes restricciones:

1.  $\varepsilon_t$  es un proceso distribuido con media cero y desviación típica igual a uno.
2. Los parámetros  $w > 0$  y  $a_i \geq 0$  e  $i=1\dots q$ , Es fundamental para cumplir con la condición de estacionariedad en media, es decir que la suma de todos los parámetros sea menor que la unidad.
3. Si  $\varepsilon_t$  es gaussiano y se distribuye según una normal  $y_t$  es condicionalmente normal y su varianza es  $\sigma^2$

La ampliación del modelo ARCH, en el cual se pueden mostrar ciertas dificultades en la estimación cuando se aplica a estructuras dinámicas en los cuadrados de las series; en ocasiones el número de retardos es muy elevado y conllevaría a altas iteraciones para alcanzar el sistema planteado. El modelo GARCH (p, q) se escribe como:

$$Y_t = \varepsilon_t \sigma_t$$

$$\sigma_t^2 = w + \sum_{i=1}^q a_i y_{t-1}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-1}^2$$

De esta manera, el modelo ARCH (q) anterior no sería más que un caso en donde todos los parámetros  $\beta_i$  son igual a cero. (ARCE, 1998)

Donde se presentan las siguientes características:

1.  $\varepsilon_t$  es un proceso distribuido con media cero y desviación típica igual a uno.

2. Los parámetros  $w > 0$  y  $\alpha_i, \beta_i \geq 0$  e  $i=1...q$ , para cumplirse la condición de estacionariedad en media, la suma de todos los parámetros debe ser menor que la unidad.
3. La función de distribución marginal no es conocida, pero se pueden calcular los primeros momentos y definir el proceso respecto a su media y varianza

## 2.4 DIFUSIÓN POR SALTOS

Este apartado pretende valorar el precio strike mediante una metodología que refleje el comportamiento real de los precios, es decir que se ajuste a la distribución de la serie y su valoración se realice teniendo en cuenta esta distribución, esta metodología se conoce como difusión por saltos que consiste en adicionar saltos al proceso de movimiento browniano para reconocer el verdadero comportamiento del precio de los activos financieros, en Colombia no es posible obtener directamente la volatilidad implícita del mercado de opciones debido a la ausencia de este, sin embargo es posible realizar una estimación de la superficie de volatilidad a partir de la simulación de un proceso estocástico de los precios de los activos subyacentes, existen diferentes modelos para ello, uno de ellos es la aproximación por difusión con saltos. El proceso de difusión con saltos para el cambio en el precio de un activo, es definido por (Wilmott, 2009) como:

$$dS = \mu S dt + \sigma dZ + \sum_{j=1}^J -1 S d q_j$$

Donde

$$d q_j = \begin{cases} 0 & \text{con probabilidad } 1 - \lambda t dt \\ 1 & \text{con probabilidad } \lambda(t) \end{cases}$$

$\mu$ : Media del proceso de cambio del activo

$S$ : Precio del activo

$\sigma$ : Desviación estándar del proceso de cambio del activo

$J - 1$  : Tamaño del salto

$\lambda$ : Intensidad del proceso de Poisson

$dZ$ : Proceso estándar Gauss-Wiener (Movimiento Browniano)

El proceso de difusión con saltos, como indica Merton (1976), es una combinación entre dos procesos independientes, un proceso estocástico continuo o Movimiento Browniano  $dZ$ , el cual captura el comportamiento normal del precio de los activos y un proceso basado en una distribución de Poisson  $dq$ , que recoge el comportamiento anormal de los precios.

(León C. , Una aproximación teórica a la superficie de volatilidad en el mercado colombiano a través del modelo de difusión con saltos, 2009)

## 3. Marco legal y evolución del tipo de riesgo seleccionado, con respecto a Basilea

El comité de Basilea brinda un conjunto de principios y recomendaciones de supervisión bancaria y un adecuado marco regulatorio con el fin de obtener estándares más avanzados sobre medición y gestión de los riesgos en los servicios financieros, estos dados como respuesta a la crisis financiera internacional, los aspectos más destacados de las nuevas normas que implementa Basilea III con el objetivo de simplificar el riesgo, de asegurar la capacidad de los bancos de absorber las pérdidas derivadas de los riesgos inherentes a su actividad que su vez tendrán un impacto en los ámbitos de gestión.

“El comité de supervisión bancaria de Basilea se creó en 1974, su primer acuerdo denominado Basilea I se publicó en 1984” (Solutions, 2012), este estableció que una entidad debería tener un capital mínimo de un 8% de los riesgos asociados a su objeto social, con el fin de poder asumir sus pérdidas, lo anterior no contempló los riesgos asociadas por la contraparte, ni los nuevos instrumentos financieros, por tanto en 2004 se publicó Basilea II, con tres pilares el pilar I estableció la metodología para calcular el capital mínimo para cubrir los riesgos de crédito, de mercado y operacional, el pilar II contemplaba incrementar la capacidad de autoevaluación y desarrollo de modelos de capital económico que integrasen todos los riesgos, por último el pilar III, requería transparencia e información clara sobre el perfil de riesgo, las actividades y controles adoptados para mitigar los riesgos asumidos.

Basilea III se publicó en 2010 con el objetivo de garantizar la solvencia y la liquidez de las entidades financieras, mejorar la calidad del capital bancario, elevar el nivel exigido de capital y poder reducir el riesgo sistémico y la prociclicidad.

Para cumplir el propósito anterior se establecieron las siguientes medidas basadas en el informe del comité de supervisión bancaria de Basilea publicado por el banco de pagos internacionales:

- Mayor ratio de solvencia y calidad del capital.
- Nuevo ratio de apalancamiento.

- Un mayor nivel de riesgo admite mayores necesidades de capital.
- Incorporación de Buffers de capital contracíclicos.
- Revisión de normativa provisiones e impacto en los resultados.
- Nuevo marco regulatorio para la medición y control de la liquidez.
- Mayor transparencia en el mercado.

Los cambios o nuevas reformas de Basilea III con respecto al riesgo de mercado son la introducción de un requerimiento de capital por VaR estresado que será adicional al requerimiento existente por VaR, además, un requerimiento de capital que captura los riesgos de impago y de una disminución en la calificación crediticia de las exposiciones de la cartera; Nuevos componentes adicionales en los requerimientos de capital para riesgo de titularización y Retitularización de activos, además, se modificó el cálculo de los riesgos para determinadas exposiciones en derivados, contemplando el riesgo de contraparte.

Actualmente Colombia establece nuevos retos de la banca frente a las mejores prácticas internacionales recomendadas por Basilea, Fitch Ratings anuncio “las modificaciones que la banca colombiana ha implementado: mantener el capital regulatorio en el 9% de los activos ponderados por riesgo y una relación de solvencia básica mínima de 4.5%” (RATINGS, 2012)

#### **4. ALTA VOLATILIDAD EN EL MERCADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Los mercados eléctricos del mundo han evolucionado de sistemas administrados de manera centralizada a sistemas desregulados conformados por empresas con actividades comerciales completamente diferenciadas, lo cual conduce a un mercado de competencia libre. El mercado eléctrico es afectado de manera importante por la estacionalidad climática debido al alto componente hidráulico, la energía no puede ser almacenada, por lo anterior la oferta y la demanda deben ser iguales en el tiempo, esto contribuye a que este mercado presente altas volatilidades de precios.

Todo lo anterior se constituye en un factor de riesgo muy importante para los agentes participantes del mercado, debido a la inexistencia de señales de precios de largo plazo para proyectos de inversión y ocasiona riesgos tanto a los generadores, debido a que la

generación queda expuesta al mercado spot, como a los comercializadores, pues no logran un cubrimiento total de la demanda mediante contratos bilaterales de electricidad, exponiéndose igualmente a la volatilidad de este mercado de corto plazo.

El cubrimiento de precios que los comercializadores pueden hacer para evitar la volatilidad de este mercado, se efectúa mediante el uso de contratos bilaterales, los cuales tienen altos costos de transacción, carecen igualmente de señales de precios de largo plazo para la determinación de sus precios futuros.

El objeto de estudio del presente trabajo es evidenciar que los derivados financieros ofrecen para productores y comercializadores de energía la posibilidad de fijar sus flujos futuros de caja ante la incertidumbre generada por la alta volatilidad del precio de bolsa de energía. Se trata para estos agentes de un instrumento de cobertura que permite generar una aproximación sobre los precios futuros haciendo predecible el desarrollo financiero del negocio y por ende las perspectivas de inversión y crecimiento.

En nuestro caso de estudio la energía eléctrica es primordial en los proyectos de inversión debido a que este es un mercado inelástico en el cual es necesario contar con este subyacente en el tiempo estimado, a su vez este proyecto está dirigido a los generadores y comercializadores que deben cumplir con la negociación de la energía debido a su importancia en la producción de bienes y servicios en la economía colombiana.

por lo anterior se decidió evaluar las opciones asiáticas como estrategia de inversión debido a que se reducen las posibilidades de manipulación del precio del subyacente en fechas próximas al vencimiento; este mercado es muy volátil por su dependencia con los cambios climáticos, de esta manera las opciones asiáticas se adecua más a la característica de regularidad de la operación y además se consigue una cobertura a menor precio en comparación a las opciones tradicionales; escogimos este tipo de opción financiera como objeto de estudio porque suaviza el pago de las opciones sobre la energía eléctrica, en cambio las opciones barrera y similares pierden su vida cuando se pasa una barrera establecida, en nuestro caso nos parece un mercado muy volátil para tomar en cuenta esta característica y se pueden perder oportunidades de inversión sobre la energía eléctrica.

#### 4.1 HISTORIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA COLOMBIA

El precio de la electricidad en el mercado colombiano y su alta volatilidad es uno de los insumos más importantes en la cuantificación del riesgo en los mercados financieros y en el mercado eléctrico no es la excepción; ésta característica inherente de las series de precios es quizá uno de los mayores objetos de estudio en el ámbito mundial por su relevancia en la administración del riesgo de precio sobre cualquier activo.

El servicio de la energía eléctrica se inició a finales del siglo XIX por los inversionistas privados, que iniciaron las empresas con la finalidad de generar, distribuir y comercializar electricidad, los primeros sistemas eléctricos fueron desarrollados por empresas privadas o mixtas para prestar servicios como el alumbrado público, en 1996 se firmó, el acuerdo de interconexión de sus sistemas y extensión de la capacidad de generación. Dicho acuerdo contemplaba la creación de una nueva empresa encargada de realizar la interconexión y de construir los proyectos de mayor tamaño para abastecer la demanda nacional, la empresa de Interconexión Eléctrica S.A. ISA se convirtió pronto en la supremacía del sector eléctrico colombiano, mantenía una relación privilegiada con la banca multilateral y con el Gobierno Nacional. Al cabo de dos años ISA se habría convertido en la generadora monopolio natural del país.

“Los logros entre 1970 y 1990 se dio una expansión de interconexión por todo el país, esta expansión fue financiada en un 60% con recursos de la banca multilateral. Entre 1970 y 1986 el BM le otorgó a diversas empresas del sector 15 créditos por US\$ 1.937 millones” (Alvarez, 2014). Otro tanto hizo el BID con 20 créditos. Los bancos se esforzaban para que los proyectos fueran financieramente viables, pero, se exigía el aval de la Nación. La deuda del sector eléctrico se fue convirtiendo en el principal problema macroeconómico del país llegó a representar un 40% del endeudamiento externo.

A partir de los años 80 el sector eléctrico colombiano entra en crisis como consecuencia de múltiples ineficiencias en la planeación, estructuración, coordinación de las entidades del sector, esta situación conlleva a considerables pérdidas y bajo recaudo y, en consecuencia, incapacidad de cumplir con el servicio de

la deuda con la banca multilateral. La Nación respondía y en compensación fue tomando el control accionario de la mayoría de las electrificadoras departamentales y de ISA.

Se da inicio a las reformas estructurales en las economías de los países latinoamericanos orientadas a mejorar la presentación del servicio, calidad, disponibilidad, y precio a los consumidores de energía eléctrica, se planteó una introducción de la libre competencia y fomento a la inversión privada, además de la privatización de las compañías estatales, una eliminación de la integración vertical y la reducción de la presencia del estado, es decir que los servicios públicos pueden ser prestados por particulares mientras el estado ejerce la regulación y el control.

La introducción de dicha reforma conlleva a una regulación en los procesos los cuales comenzaron a reflejar el costo real de la producción y comercialización de energía, con lo anterior se genera una alta volatilidad en los precios ya que responden a los cambios en la disponibilidad del agua, los precios internacionales de los hidrocarburos, las variaciones estacionales que afectan la demanda o la oferta, los ciclos económicos, la regulación ambiental, entre otras.

El mercado energético mayorista (MEM) entro en funcionamiento el 20 de julio de 1995 está conformado por dos mercados el regulado que está sujeto a las tarifas establecidas por la CREG, participan los generadores, comercializadores, distribuidores y transmisores, el funcionamiento esta soportado en la existencia de una bolsa de energía BE en la que se realizan intercambios comerciales definidos por el contexto de un mercado spot, mercado en el cual las transacciones ocurren de contado y la entrega es inmediata, además un mercado de contratos financieros y transacciones directas en la bolsa de energía, cuenta con instituciones como CRA Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, SSP superintendencia de servicios públicos Y UPME la unidad de planeación minero energética, es una unidad administrativa especial del orden nacional, de carácter técnico, adscrita al ministerio de minas y energía, dichas instituciones han contribuido a un buen desarrollo del sector.

“El marco legal colombiano de energía eléctrica nace en 1944 con la aprobación de las leyes 142 ley eléctrica y 143 ley de servicios públicos, en las cuales se

reglamentan las actividades y el proceso del sector” (UltraBursatiles, 2013), El sector energético se encuentra regulado por el ministerio de minas y energía quien establece las políticas pertinentes a la generación, transmisión, procesamiento y distribución, La planeación del sistema, el aseguramiento del servicio para la población está dado por CREG comisión de regulación de energía y gas.

#### 4.1 Descripción de la información

El análisis, modelación y evaluación de los tres tipos de opciones financieras sobre la energía eléctrica se realizó con la generación de precios mediante difusión por saltos y simulación de Montecarlo, al igual se modela la volatilidad estocástica mediante modelos ARCH y GARCH.

Para llevar a cabo este estudio se toma la serie de precios diarios obtenidos del sistema NEON, el cual está disponible en la página de la compañía de expertos en mercados S.A E.S.P. se decidió utilizar los precios diarios por el problema de estacionalidad que está presente en el mercado, de tal manera que la serie sea útil para realizar un análisis completo con sus variaciones diarias; la serie inicia desde el primero de enero de 2000 hasta el siete de noviembre de 2014, este mercado tranza negociaciones 7 días a la semana, por tal razón los cálculos se realizaron en base 365.

En el periodo establecido para la investigación (2000-2014), son muy marcados los cambios de precio de un día para otro en diferentes momentos del horizonte, el precio muestra en su comportamiento los efectos complejos de la actividad de oferta, demanda y regulación.

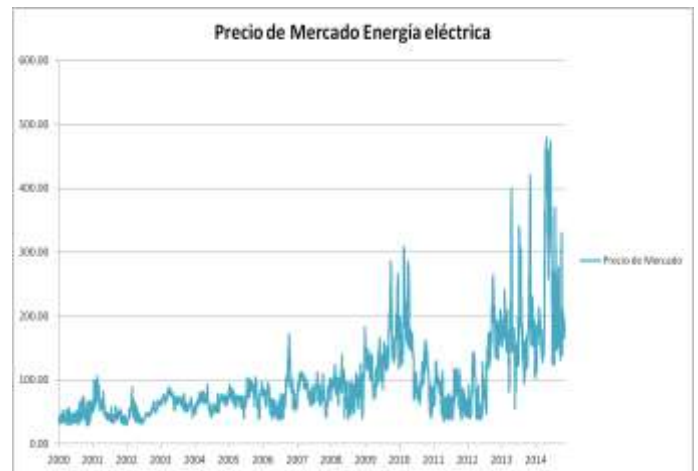
#### 4.2 Análisis descriptivo

El grafico 1 muestra la evolución del precio spot de la energía eléctrica para el periodo entre el 2000 y 2014, la característica fundamental es su alta volatilidad; se puede observar que el precio oscila y la tendencia para todo el periodo es creciente, esto se presenta en primer lugar por ser un mercado oligopólico y en segundo lugar por el alto componente hidráulico, de esta manera hace que el precio dependa de las condiciones climáticas.

Los periodos donde se observa el precio más alto corresponden generalmente a un clima seco, es decir a

la presencia del fenómeno del Niño debido a que disminuye el nivel de embalse del sistema como ocurrió en los últimos cuatro meses de 2006 y principios de 2007, entre los últimos seis de 2009 y los primeros cuatro de 2010 y a mediados de 2012. La contraparte de la oscilación del clima es “La Niña”, fenómeno que determina altos niveles de pluviosidad, la disminución en el precio spot a mediados de 2010 puede explicarse por la presencia de este fenómeno hasta principio de 2011.

Grafico 1. Movimiento Precio Spot energía eléctrica 2000 - 2014



Fuente: Elaboración propia

##### 4.2.1 Hechos estilizados

Se realizó un análisis de las características y hechos simplificados de la serie de datos como lo es determinar si presenta estacionariedad y normalidad, con el objetivo de definir el comportamiento de este mercado para el tiempo de estudio.

De acuerdo al comportamiento de la serie con respecto al cumplimiento de los hechos estilizados se concluye lo siguiente:

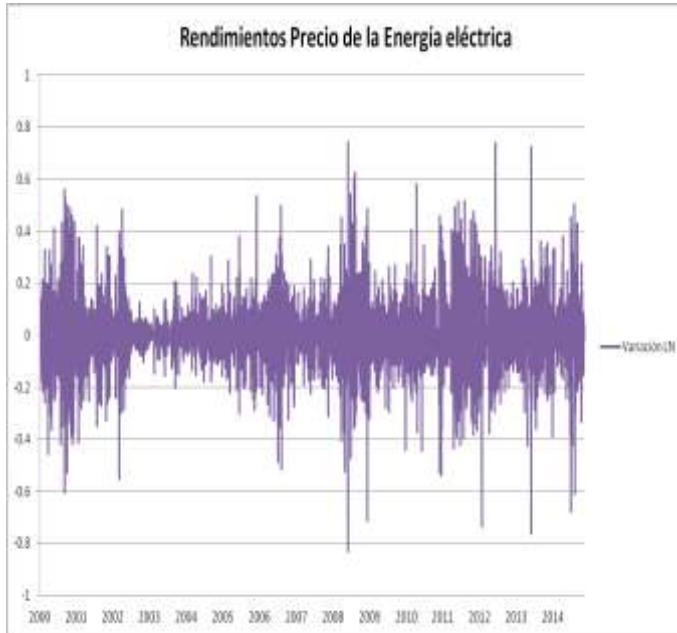
##### a. Prueba de estacionariedad.

Para determinar si la serie corresponde a un camino aleatorio (proceso con raíz unitaria) se realizó la prueba de Dickey y Fueller sobre los rendimientos del precio de la energía eléctrica en la cual la hipótesis nula consiste en que el proceso sigue un camino aleatorio, mientras que la hipótesis alterna corresponde a un proceso ARMA estacionario.

De acuerdo a la tabla 3 presentada en los anexos se rechaza la hipótesis nula lo que indica que la serie de variaciones del precio de la energía eléctrica es

estacionaria y objeto de análisis para el presente trabajo.

Grafico 2. Variaciones Precio Spot energía eléctrica 2000 - 2014

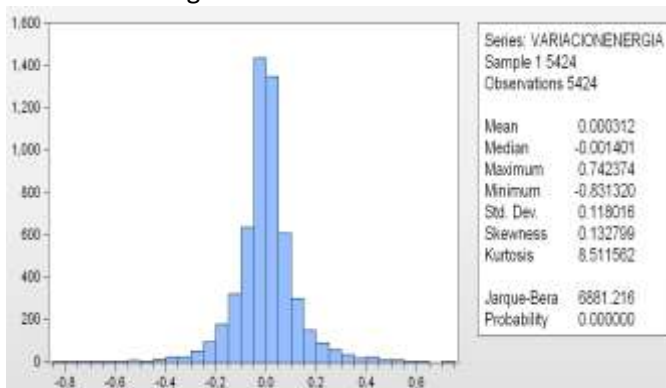


Fuente: Elaboración propia

#### b. Análisis de Colas pesadas

De acuerdo al histograma en el grafico 3 se identifica que la serie de rendimientos posee una acumulación de datos significativa en los extremos, esto se identifica al tener una kurtosis de 8.5115, por lo anterior se afirma que los rendimientos siguen una distribución leptocurtica en la cual la curva es más apuntada y con colas más anchas que la normal.

Grafico 3. Histograma rendimientos Diarios



Fuente: Elaboración propia

#### c. Prueba de Normalidad agregada

Las variaciones del precio de la energía eléctrica no siguen una distribución normal de acuerdo a la prueba

de Jarque-Bera como se puede validar en la tabla 4 de los anexos en la cual con una probabilidad del 0% inferior al grado de significancia del 5% se rechaza la hipótesis nula, por lo anterior se establece que la serie de datos no sigue una distribución normal.

Por lo anterior, para modelar los precios de la energía eléctrica se realiza el proceso de difusión por saltos de esta manera se adicionan saltos al movimiento browniano para reconocer el verdadero comportamiento del precio debido a que los datos no siguen una distribución normal.

### 4.3 Descripción metodológica

Se realizan diferentes metodologías para obtener la información necesaria para valorar las opciones financieras, de esta manera se realiza el pronóstico de la volatilidad mediante modelos estocásticos ARCH y GARCH; debido a la ausencia de un mercado de opciones financieras en el mercado de energía colombiano, se emplea la simulación de Montecarlo y Difusión por saltos de acuerdo a los resultados obtenidos al hacer las pruebas de hechos estilizados.

#### a. Volatilidad estocástica

Se definió el modelo ARIMA y se validaron los supuestos de estacionariedad e invertibilidad para definir el modelo GARCH, de esta manera se procede a realizar los pronósticos dinámicos de las variaciones del precio de la energía eléctrica y de la volatilidad estocástica para un horizonte de 30 días.

#### b. Pronóstico precios Strike

El pronóstico de las variaciones de los precios de la energía eléctrica se realizó con la metodología de difusión por saltos la cual consiste en adicionar saltos al movimiento browniano para reconocer el verdadero comportamiento de los rendimientos del precio de la energía eléctrica.

Se generaron 3 series a cada una de estas se asocia una distribución para llevar a cabo el pronóstico de los precios, se realizaron 10.000 simulaciones por día para un horizonte de 30 días; para el pronóstico de la serie final se hizo una equivalencia de estas 3 matrices en donde se adiciona los saltos a la serie browniana, con estos pronósticos se realiza la valoración de las opciones.

### c. Muestra aleatoria

Con la finalidad de desarrollar un análisis de diferentes escenarios para el precio strike de la energía eléctrica se obtuvo una muestra aleatoria de las simulaciones realizadas mediante difusión por saltos. Esta muestra está compuesta de 5 posibles precios Strike para cada uno de los siguientes plazos 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 30 días.

### d. Valoración opciones europeas por el modelo de Black and scholes

Se realizó la valoración de 2 opciones europeas por el modelo expuesto por Black and Scholes, la primera valoración se realizó con volatilidad constante de acuerdo a los supuestos del modelo de Black and Scholes; la segunda valoración se realizó con volatilidad estocástica desarrollado por el modelo GARCH, esta volatilidad incumple uno de los supuestos del modelo de Black and Scholes en donde la volatilidad de los retornos es constante, sin embargo quisimos realizar una aproximación a los modelos de volatilidad estocástica para la valoración de opciones Europeas.

### e. Pronostico precios spot y valoración opciones asiáticas.

El pronosticó del precio spot se realizó mediante la simulación de Montecarlo, se realiza de acuerdo a la demostración presentada en el paper "análisis de la valoración de las opciones asiáticas utilizadas por los fondos de inversión garantizados de renta variable"

El valor de una opción call asiática en la fecha de ejercicio es:

$$\text{Máx } 0, A T_n - K, \text{ donde } A T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S T_i$$

Siendo  $S T_i$  el precio del subyacente en las fechas tomadas como referencia,  $n$  el número de referencias tomadas,  $T_i$  la fecha en que se toma la referencia  $i$ -ésima,  $T_n$  la fecha en la que expira la opción y  $K$  el precio de ejercicio. El problema de valorar una opción asiática es conocer el precio del subyacente, se supone que el precio del subyacente sigue un proceso de difusión geométrico:

$$dS = \mu S dt + \sigma S dz$$

Donde  $S$  es la cotización del subyacente,  $dS$  la variación de  $S$  en un intervalo infinitesimal de tiempo  $dt$ ,  $\mu$  es la esperanza matemática del rendimiento instantáneo del subyacente,  $\sigma$  su desviación típica y  $dz$  un proceso de Wiener, es decir  $dz \sim N(0, dt)$

De acuerdo a los supuestos del modelo de Black and Scholes expuestos en el marco teórico para un intervalo de tiempo  $(t, T_i)$ , con  $T_i > t$ , se tiene que el valor de las opciones en un instante  $t$  se puede expresar como el valor actual del flujo monetario esperado al vencimiento de la opción:

$$C = e^{-r T_n - t} E(\text{Máx } 0, A T_n - K)$$

Donde  $r$  es el tipo de interés sin riesgo anualizado,  $E$  la esperanza matemática y  $S(T)$  sigue un proceso de difusión geométrico. Bajo los supuestos el precio del subyacente sigue una distribución logarítmico-normal:

$$\ln S_T \sim N(\ln S_t + (r - q - \frac{\sigma^2}{2})(T - t), \sigma \sqrt{T - t}) \quad (1)$$

Donde  $S_t$  y  $S_T$  son el precio de subyacente en el momento  $t$  y en un momento posterior  $T$ .

Si  $f^*(x) = \text{Prob } A T_n = w$  representa la función de densidad de  $A T_n$ , la esperanza matemática se puede expresar de la siguiente manera:

$$E \text{ Máx } 0, A T_n - K = \int_K^{\infty} (A T_n - K) f^*(x) dx$$

Sin embargo  $A T_n$  no sigue ninguna distribución conocida, por lo tanto para el cálculo de  $E(\text{Máx } 0, A T_n - K)$  es necesario recurrir a procedimientos numéricos.

Por lo anterior, la variable aleatoria cuya distribución desconocemos es la media aritmética de los valores alcanzados por el precio de la energía eléctrica, de esta manera se requiere la generación de simulaciones del proceso de cotizaciones de la energía eléctrica  $S T_1, S T_2, \dots, S T_n$  teniendo en cuenta la expresión 1 se realiza la siguiente igualdad:

$$S T_i = S T_{i-1} e^{(r - q - \frac{\sigma^2}{2})(T_i - T_{i-1}) + \sigma \varepsilon_i \sqrt{T_i - T_{i-1}}}$$

La simulación consiste en generar de forma aleatoria los valores  $\varepsilon_i$  para calcular a partir de los valores obtenidos, la secuencia de valores  $S T_i$  con lo que tendremos un valor  $A T_n$ . Repitiendo el proceso un número elevado de veces obtendremos la muestra artificial deseada, a partir de la cual podremos obtener  $E(Máx 0, A T_n - K)$ . De esta manera podremos calcular una estimación del valor de la opción:

$$C = e^{-r(T_n-t)} E Máx 0, A T_n - K$$

**f. Backtesting**

Se realizaron los cálculos desde el 1 de enero del año 2000 hasta el 22 de octubre del 2014, de esta manera se realiza el backtesting del valor de las opciones para el periodo del 23 de octubre del 2014 al 22 de noviembre del 2014.

**4.4 Modelación**

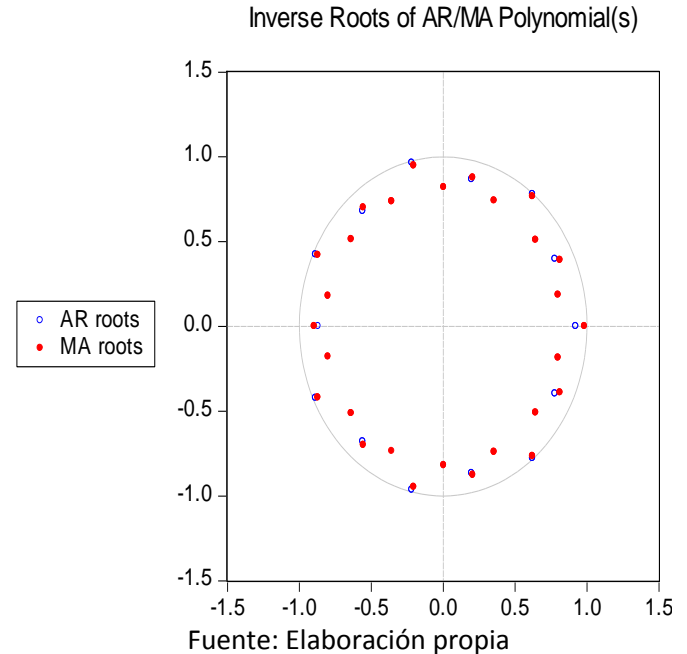
Se desarrollan y evalúan los modelos propuestos en la descripción metodológica con el objetivo de desarrollar la información necesaria para valorar las opciones; en el presente apartado se muestran las principales pruebas y resultados obtenidos en el desarrollo de los modelos propuestos para el mercado de energía eléctrica en Colombia.

**4.4.1 Volatilidad estocástica mediante modelo ARCH y GARCH**

Se define el modelo ARIMA (14,0, 28) de acuerdo al correlograma presentado en la tabla 5 de los anexos, mediante este modelo se presenta la dependencia que tiene la serie con su pasado.

El modelo propuesto ARIMA debe cumplir las condiciones de estacionariedad e invertibilidad, de acuerdo al grafico 4 y tabla 6 de los anexos se valida que el inverso de las raíces del polinomio asociado al AR y el MA están dentro del círculo unitario; a su vez Se valida mediante el TEST de Heterocedasticidad ARCH con un p-valor de 0% que la volatilidad de la serie de las variaciones del precio de la energía eléctrica se pueden generar mediante modelos ARCH y GARCH.

Grafico 4. Circulo de Raíces inversas polinomios asociados



Al finalizar la validación de los supuestos, se realiza el modelo GARCH para la predicción de la volatilidad de las variaciones en el precio de la energía eléctrica de acuerdo a los rezagos significativos que se pueden evidenciar en la tabla 8 de los anexos; el modelo obtenido es el siguiente:

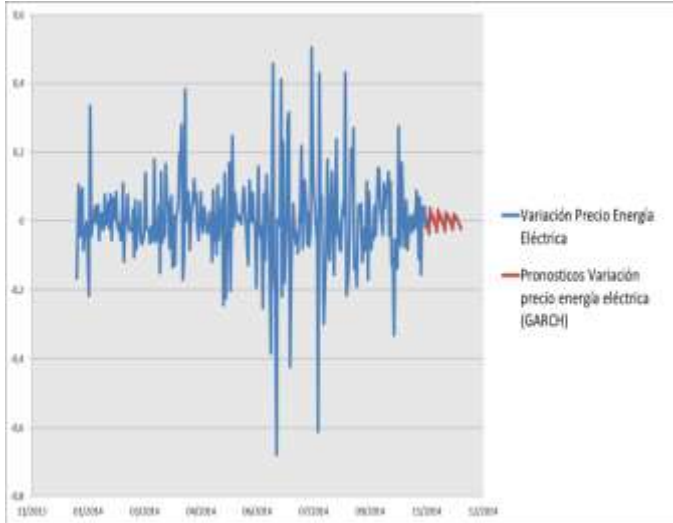
$$\sigma_t = 8.10 \times 10^{-5} + 0.903342\sigma_{t-1} + 0.099118\varepsilon_{t-1}$$

De acuerdo al modelo propuesto por la metodología GARCH se realizaron los pronósticos dinámicos de las variaciones del precio de la energía eléctrica, este comportamiento se puede observar en el grafico 5.

Debido a la baja precisión de los modelos de series de tiempo en horizontes de tiempo elevados se realizan los pronósticos de la volatilidad para la variación del precio de la energía eléctrica para un horizonte de 30 días con el modelo GARCH obtenido. El pronóstico de volatilidad es presentado en la tabla 10 de los anexos se utilizó para la valoración de las opciones estándar sobre la energía eléctrica.



Grafico 5. Pronósticos variación precio energía eléctrica (GARCH)



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2 Difusión por saltos

##### a. Definición saltos

Se elige una desviación de 1.48 para determinar la altura de los saltos de 0.174976, al realizar la prueba de normalidad de Jarque-Bera no se rechaza la hipótesis nula y la curtosis es aproximada a 0 por tal motivo se asume normalidad en la serie; con lo anterior se logra obtener las tres series a analizar:

- Serie con comportamiento browniano
- Serie con saltos
- Serie binomial

A las anteriores series se les realizó una prueba de bondad de ajuste de una distribución según el estadístico de Kolmogorov-Smirnov para determinar los parámetros de dicha distribución teórica.

##### b. Análisis de distribuciones

- Distribución exponencial

De la serie de saltos se realiza la prueba de bondad de ajuste, mediante esta prueba se define que la serie sigue una distribución exponencial; este tipo de distribución es similar a la distribución Gamma, sin embargo este tipo de distribución plantea cuanto tiempo tarda en ocurrir el primer evento.

- Distribución Bernoulli

Dado que los saltos son medidos con determinada frecuencia, es posible utilizar la característica del proceso de Poisson que permite una aproximación a la distribución binomial, esta se basa en que en un intervalo de tiempo significativamente pequeño puede ocurrir máximo un salto (Ospina, Estimación de un Modelo de Difusión con Saltos con Distribución de Error Generalizada Asimétrica usando Algoritmos Evolutivos, 2009), por lo anterior:

Si  $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$  entonces

$$\text{Prob } X = k = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2)$$

Siendo  $\Delta p(t)$  la variación de saltos entre dos instantes de tiempo, es decir

$$\Delta P_t = P_{t+\Delta t} - P_t \quad (3)$$

La ecuación 3 satisface  $\Delta P_t \sim \text{Poisson}(\lambda \Delta t)$  Por lo tanto,

$$\text{Prob } \Delta P_t = k = \frac{e^{-\lambda \Delta t} (\lambda \Delta t)^k}{k!} \quad (4)$$

Si siguiendo con la aproximación a la distribución binomial, si en un pequeño intervalo de tiempo ocurre a lo más un salto, utilizando 4 se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Prob } \Delta P_t = 0 &= e^{-\lambda \Delta t} \\ \text{Prob } \Delta P_t = 1 &= \lambda \Delta t e^{-\lambda \Delta t} \\ \text{Prob } \Delta P_t > 1 &\cong 0 \end{aligned}$$

Aplicando la expansión de series de Taylor sobre las probabilidades, alrededor de cero, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Prob } \Delta P_t = 0 &= e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + \frac{1}{2} \lambda \Delta t^2 + O^3 \lambda \Delta t \\ \text{Prob } \Delta P_t = 1 &= \lambda \Delta t e^{-\lambda \Delta t} = \lambda \Delta t - \lambda \Delta t^2 + O^3 \lambda \Delta t \\ \text{Prob } \Delta P_t > 1 &= 1 - \text{Prob } \Delta P_t \leq 1 = \frac{1}{2} \lambda \Delta t^2 + O^3 \lambda \Delta t \end{aligned}$$

Si  $\lambda \Delta t$  es suficientemente pequeño entonces los valores de  $\lambda \Delta t^2$  y  $O^3 \lambda \Delta t$  son despreciables.

$$\begin{aligned} \text{Prob } \Delta P_t = 0 &\approx 1 - \lambda \Delta t \\ \text{Prob } \Delta P_t = 1 &\approx \lambda \Delta t \\ \text{Prob } \Delta P_t > 1 &\approx 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto  $\Delta P_t$  se puede aproximar a una distribución binomial de parámetros 1 y  $\lambda \Delta t$ , esto

significa  $\Delta P t \cong \text{Bin}(1, \lambda \Delta t)$  o lo que es lo mismo  $\Delta P t \cong \text{Bernoulli}(\lambda \Delta t)$ .

Esta metodología también fue usada en el trabajo de grado “Modelos de valoración de opciones financieras: algunas extensiones con énfasis en representaciones del imaginario de volatilidad en el contexto del Mercado de renta fija en Colombia” realizado por Angie Orozco y Neixon Rincón de la universidad Piloto de Colombia.

De acuerdo a lo anterior se define como una serie Bernoulli la cual es una distribución de probabilidad discreta, que toma valor 1 para la probabilidad de éxito ( $p$ ) y valor 0 para la probabilidad de fracaso ( $q$ ), con una probabilidad de éxito de 0,11043510

En la siguiente tabla se muestran los parámetros estadísticos obtenidos al realizar el análisis de cada una de las series de acuerdo a la distribución definida.

Serie	Browniana	Salto
Distribución	Normal	Exponencial
Parámetros	Media	0.00
	Desviación estándar	0.07
	Asimetría	1.89
	Curtosis	-0.02

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3 Pronostico spot

Se realizó la simulación del precio spot mediante la siguiente ecuación:

$$S T_i = S T_{i-1} e^{r-q-\frac{\sigma^2}{2}} T_{i-t} + \sigma \varepsilon_i \overline{T_i - T_{i-1}}$$

La simulación consiste en generar de forma aleatoria los valores  $\varepsilon_i$  de esta manera se calcula la secuencia de valores  $S T_i$ , con lo que tendremos un valor  $A T_n$  de acuerdo a la descripción metodológica enunciada.

En nuestro caso de estudio se realizaron 20.000 simulaciones para cada uno de los días a pronosticar ( $t=30$ ), en el grafico 6 se puede comparar para el periodo del 23 de octubre del 2014 al 21 de noviembre del 2014 los valores reales con los valores pronosticados del precio de la energía eléctrica.

Grafico 6. Pronósticos Spot Simulación de Montecarlo



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4 Muestra aleatoria Precios Strike

Se realizó una muestra aleatoria de los strike obtenidos mediante difusión por saltos, de esta manera con esta muestra se realiza la valoración de las dos opciones clásicas y la opción asiática a diferentes plazos. La muestra es de 5 simulaciones para 8 diferentes fechas de vencimiento (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 30 días), se puede revisar la muestra aleatoria en la tabla 12 de los anexos.

#### 4.5 Análisis de resultados

Mediante la valoración de las tres opciones (opciones clásicas europea con volatilidad constante, opciones clásicas europea con volatilidad GARCH y opciones Asiáticas) se logra analizar lo siguiente:

- ✓ Los precios de las opciones clásicas con volatilidad GARCH son inferiores a los realizados mediante la desviación constante en todas las simulaciones para cada uno de los vencimientos; esto se debe principalmente a los saltos que posee las variaciones del precio de la energía eléctrica que generan una alta volatilidad para utilizar una distribución normal como lo indica los supuestos del modelo Black and Scholes.
- ✓ Los precios de las opciones asiáticas son inferiores al precio de las opciones clásicas europeas, esto se debe a que en las opciones tradicionales para valorarlas hay que tener en cuenta el precio Spot sobre el que esté hecha la opción, en las opciones asiáticas el precio Spot a tener en cuenta será la media de los valores que alcance el activo subyacente a lo largo de la vida

de la opción, este precio medio siempre será inferior al del activo.

- ✓ De acuerdo al Payoff obtenido al valorar las opciones con los diferentes precios de ejercicio establecidos y el precio spot a la fecha de vencimiento de la opción, se puede concluir que las opciones asiáticas presentan una mejor cobertura con respecto a las demás opciones evaluadas en el presente trabajo.

Lo anterior se evidencia principalmente al tener un payoff más alto, indica que al día del vencimiento de la opción se logra una mejor cobertura con respecto a las demás opciones evaluadas, de acuerdo al precio Spot a la fecha del vencimiento; esto se debe a que las opciones Asiáticas se diseñaron para hacer más suave la función de pago, pues al depender esta del promedio del precio más que del precio terminal se evitan oscilaciones amplias en el precio cerca de la maduración, esta propiedad las hace interesante para los inversores.

- ✓ De acuerdo al siguiente gráfico, se puede observar que al evaluar 40 escenarios para las opciones Call, se establece que en una cuantía de 35 escenarios la opción asiática es el mejor instrumento para realizar estrategias de cobertura.

Grafico 7. Opciones CALL

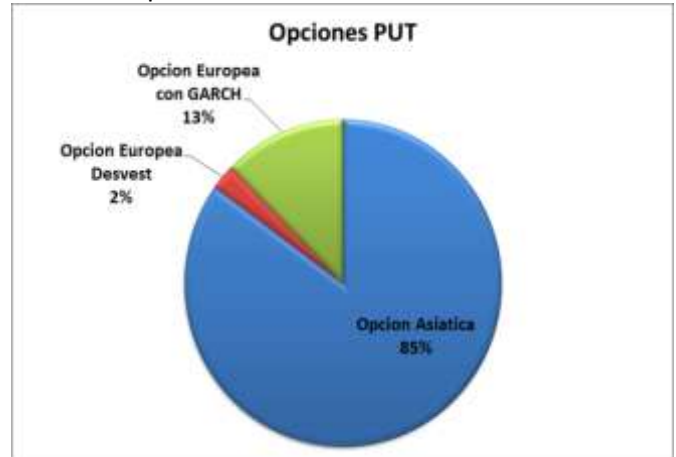


Fuente: Elaboración propia

- ✓ Al valorar las opciones Put para los mismos escenarios se escogen las opciones asiáticas como la alternativa más óptima de cobertura de acuerdo a las opciones evaluadas en el presente

trabajo, lo anterior se puede evidenciar en el siguiente gráfico.

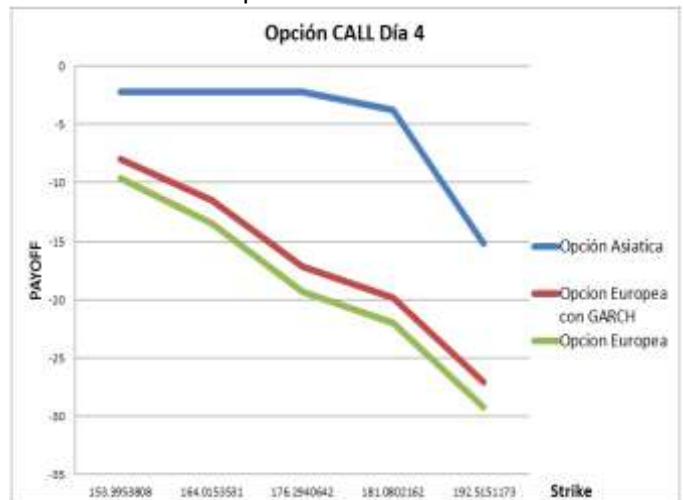
Grafico 8. Opciones PUT



Fuente: Elaboración propia

- ✓ En el Día 4 para las opciones Call se evidencia un Payoff negativo para los tres tipos de opciones, sin embargo se demuestra que con las opciones asiáticas en los 5 escenarios strike se genera una menor pérdida.

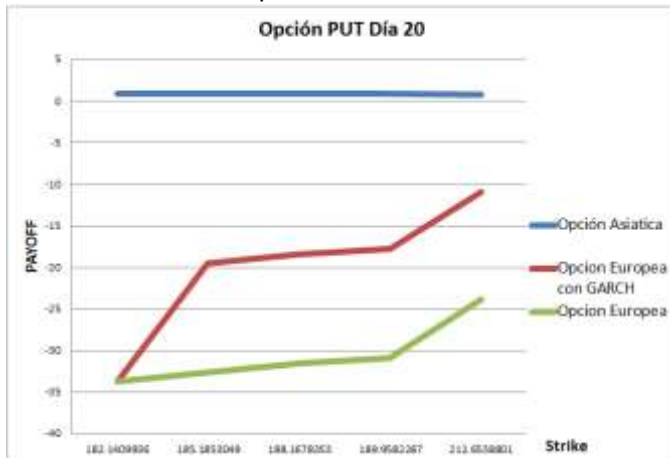
Grafico 9. PAYOFF opción CALL



Fuente: Elaboración propia

- ✓ En el siguiente grafico se muestra el Payoff de las opciones evaluadas para el día 20, en esta posición (PUT) también se obtiene una mejor cobertura con las opciones asiáticas en el mercado de energía eléctrica para los 5 escenarios de precio de ejercicio.

Grafico 10. PAYOFF opción PUT



Fuente: Elaboración propia

- ✓ De acuerdo a los pronósticos obtenidos mediante la simulación de Montecarlo para los precios spot de la energía eléctrica se determina la ausencia de las altas variaciones del precio de la energía eléctrica, el método empleado se basa en los principios del modelo de Black and Scholes, en el cual la volatilidad es constante y no refleja los saltos de la serie.
- ✓ Mediante la difusión por saltos se logra evaluar diferentes escenarios en cada uno de los periodos, de esta manera se puede validar las pérdidas o ganancias obtenidas si alguno de estos escenarios ocurre, en el presente trabajo usamos esta metodología para pronosticar los precios Strike debido a la ausencia de un mercado de opciones sobre el precio de la energía eléctrica en Colombia.

#### 4.6 Utilidad y aplicación financiera de los resultados

Los mercados eléctricos del mundo han evolucionado de sistemas administrados de manera centralizada, compuestos por empresas integradas verticalmente a sistemas desregulados conformados por empresas con actividades comerciales diferentes, lo cual conduce a un mercado de competencia libre, para garantizar la existencia de una competencia efectiva en un mercado competitivo, se requiere que los participantes de este mercado cuenten con herramientas que les permitan definir sus estrategias de venta y de compra; a su vez el mercado eléctrico es afectado de manera importante por la estacionalidad climática y la energía no puede ser almacenada para periodos de escasez, esto contribuye a que este mercado presente altas volatilidades de precios. Todo lo anterior se constituye

en un factor de riesgo para los participantes de este mercado, debido a la inexistencia de señales de precios de largo plazo para proyectos de inversión.

Por lo anterior, con el propósito de mejorar las condiciones de competencia en el mercado de contratos, evitar la segregación del sector, permitir la participación de nuevos actores y nuevos clientes, incrementar el dinamismo del mercado es importante evolucionar en este mercado mediante la introducción de los instrumentos que ofrece un mercado de derivados financieros energéticos. En el presente trabajo se desarrollaron los escenarios de incluir instrumentos derivados como lo son las opciones financieras en el sector energético; se realizó una aproximación de cómo sería su negociación mediante diversas metodologías que aportaran dinamismo a la simulación de precios como lo es el uso de difusión por saltos debido a que Colombia no posee un mercado desarrollado de derivados financieros sobre la energía eléctrica, a su vez se modeló la volatilidad mediante la metodología GARCH de esta manera se realiza una aproximación a la volatilidad estocástica debido a que este mercado eléctrico presenta una alta volatilidad.

Con los resultados obtenidos al realizar los diferentes modelos, pronósticos y simulaciones a tres diferentes tipos de opciones se establece que debido a la alta volatilidad presentada en este mercado es necesario desarrollar la incursión de nuevos instrumentos con el objetivo de mejorar la cobertura en las inversiones de los participantes de este mercado, en la comparación realizada se establece las nuevas alternativas como lo son las opciones exóticas que aportan nuevas estrategias para los inversionistas; de esta manera con la incursión de nuevos instrumentos financieros como lo son los derivados en el mercado de energía eléctrica se logra mejorar las condiciones de competencia y evolución de este mercado.

#### 5. Conclusiones

Se realizó un análisis descriptivo del comportamiento de la serie del precio de la energía eléctrica en el mercado colombiano del año 2000 al 2014, de esta manera se evalúan tres alternativas de cobertura mediante opciones financieras con el objetivo de determinar cuál de ellas se ajusta más a las características observadas en la serie de precios, es importante mencionar que para el mercado colombiano este tipo de investigación no se ha desarrollado, por lo anterior este trabajo es una primera

aproximación al uso de opciones exóticas y su utilidad financiera.

De acuerdo a la descripción metodológica y marco teórico se valoraron las opciones europeas por el modelo de Black and Scholes con volatilidad constante y volatilidad estocástica; se reconoce que calcular el valor de una opción europea con volatilidad GARCH no cumple con los supuestos de Black and Scholes enunciados, sin embargo es importante recurrir a nuevos métodos de valoración que refleje la alta volatilidad de los precios, al comparar estas valoraciones se logra concluir que el valor de una opción europea con volatilidad GARCH es inferior al valor de una opción europea con volatilidad constante, debido al efecto de los saltos del subyacente en el tiempo de estudio.

Al valorar las opciones con los distintos escenarios de precios Strike para la energía eléctrica, se logra identificar cuáles son los mejores instrumentos de cobertura para este mercado ante diferentes precios de ejercicio; de acuerdo al Payoff obtenido a la fecha de vencimiento se concluye que la prima de la opción es un factor importante para determinar si se logra obtener una apropiada cobertura.

Al realizar el análisis de resultados se logró evidenciar supuestos teóricos en donde se establecen los beneficios de las opciones asiáticas entre ellos que su precio es menor que el de las opciones estándar, esto fue evidenciado en todos los escenarios planteados en la valoración, por tanto se recomienda al inversionista el uso de opciones asiáticas para la valoración de activos subyacentes volátiles, ya que reflejan una óptima estrategia de cobertura en relación con las opciones europeas tradicionales, así mismo suavizan la función de pago al depender de un promedio del precio disminuyendo efectos de volatilidad.

El modelo de difusión por saltos nos permitió simular precios strike de la energía eléctrica para llevar a cabo la valoración de las opciones, ya que en la actualidad no contamos con un mercado desarrollado de derivados financieros sobre este subyacente; de este modo la metodología de difusión por saltos nos permitió conocer el comportamiento real de la serie y realizar las simulaciones dependiendo de la distribución que más se ajustara a los saltos de la serie.

## 6. RECOMENDACIONES

Se puede desarrollar la comparación de diferentes opciones exóticas, en las cuales su valor depende de la evolución histórica de los precios del subyacente como lo son las opciones de barrera, average strike options, lookback y parisinas; de esta manera concluir cuál de estas se genera una mayor cobertura de acuerdo al comportamiento de los precios.

En cuanto a la modelación de la volatilidad estocástica y pronósticos de esta se pueden desarrollar diferentes metodologías para ampliar el estudio de los modelos estocásticos y su utilidad en el mercado de energía eléctrica, al ser un mercado con una alta volatilidad; a su vez se pueden desarrollar diferentes comparativos para determinar cual se ajusta más a la serie de las variaciones del precio de la energía eléctrica.

Se puede realizar una investigación del mercado de derivados energéticos de los países nórdicos, en estos países se tiene una mayor evolución en los derivados energéticos de esta manera se puede realizar una mayor aproximación a las curvas de precios y se podría realizar una aproximación al uso de derivados en el mercado energético colombiano.

## 7. Bibliografía

- Alonso, F., & Albarracín, E. (Junio de 2013). *Creación de un Mercado de Opciones Estandarizadas en Colombia: Justificación y Propuesta de Implementación*. Informe de Investigación, Universidad EAN, Bogotá.
- Alvarez, L. G. (6 de Septiembre de 2014). *Blogspot*. Obtenido de <http://luisguillermovelezalvarez.blogspot.com/2011/09/breve-historia-del-sector-electrico.html>
- Antioquia, E. I. (2009). *Aplicación de los modelos GARCH a la estimación del VaR de acciones colombianas*.
- Antonio Alegre, A. B. (s.f.). *Matemática De Las Operaciones Financieras*. Barcelona: Universidad Barcelona.
- ARCE, R. (1998). *INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS AUTORREGRESIVOS*. Madrid.
- Arregui Ayastuy, G., & Vallejo Alonso, B. (s.f.). *Análisis de la valoración de las opciones Asiáticas utilizadas por los fondos de inversión garantizados de enta variable*. Vasco .
- ASOBANCARIA. (Noviembre de 2009). *Rol de la Auditoría Interna en la Gestión de Riesgos Empresariales en Entidades Bancarias*. Bogotá.
- Bahi, C. (2007). *Modelos de medición de la volatilidad en los mercados de valores: aplicación al mercado bursatil*

- Argentino. (N°. 21.933.789). Universidad Nacional de Cuyo.
- Basle Committee of Banking Supervision. (Julio de 1988). International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards. Basilea, Suiza.
- Betancourt, K., García, C., & Lozano, V. (2013). Teoría de Markowitz con metodología EWMA para la toma de decisión sobre cómo invertir su dinero. *Atlantic Review of Economics, 1*.
- Black, F., & Scholes, M. (May-Jun de 1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *The Journal of Political Economy, Vol. 81*(N°. 3), pp. 637-654.
- Bucaramanga, U. A. (2014). *Estrategia de cobertura con productos derivados para el mercado energetico colombiano*.
- Crespo Espert, J. L. (s.f.). *Aproximacion Analitica a la valoración de opciones Asiaticas de Tipo Europeo y su Utilización en si valoración Numerica*. Madrid.
- Domínguez, J. M. (s.f.). El riesgo de mercado su medición y control. Delta publicaciones.
- EAFIT, U. (2011). *Los precios forward sobre electricidad, Determinados racionalmente por los agentes del mercado colombiano ?*
- Edisson Javier Antolínez Pérez, J. F. (2010). Analisis y Valoracion del Riesgo de Precio de Energia Electrica En Colombia. *Revista UNAB*.
- Engle, R. (1981). *Autoregressive Conditional Heterocedasticity with Estimates of the Varianza of United Kingdom Inflation*. Oxford: Oxford University.
- Fernández, D. R. (octubre-diciembre de 2002). Medidas de Volatilidad. *31(114)*. España.
- Gil, M., & Ochoa, C. (2008). Modelación de la Volatilidad de los Precios de la Energía Eléctrica en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Herrera, L., & Cárdenas, D. (2013). Modelos de Valoración de Opciones sobre Títulos de Renta Fija: Aplicación al Mercado Colombiano. *29*, 77-85. Elsevier Doyma.
- Hull, J. (2009). Introducción a los Mercados de futuros y opciones. *Ed. 6*. (M. Á. Carrión, Trad.) Pearson.
- KARTZ. (1990). *History of Options* .
- Lamothe Fernández, P. (2003). *OPCIONES FINANCIERAS*. Madrid : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- León, C. (2009). Una aproximación a la superficie de volatilidad en el mercado colombiano a través del modelo de difusión con saltos. *Borradores de Economía*(N°. 570).
- Lorenzo, R. (1995). Valoración de Opciones: una Contrastación del Modelo de Difusión con Saltos de Merton.
- Merton, R. (1976). Option Pricing When Underlying Stock Returns are Discontinuous. *Journal of Financial Economics*(N°. 3), pág. 125-144.
- Metropolitana-Iztapalapa, U. A. (s.f.). *El metodo Montecarlo y su aplicacion a las finanzas* .
- Navarra, U. d. ( ). *Utilizacion Formula Black & Sholes para valorar opciones* .
- Ospina, J. (2009). Estimación de un Modelo de Difusión con Saltos con Distribución de Error Generalizada Asimétrica usando Algoritmos Evolutivos. Universidad Nacional de Colombia.
- Pereira, U. T. (2013). *Estrategia de mitigacion del riesgo para productores de energia electrica*.
- RATINGS, F. (4 de SEPTIEMBRE1 de 2012). COLOMBIA, CERCA DE BASILEA III. *EL ESPECTADOR*.
- UltraBursatiles. (2013). *Sector Energetico Colombiano: Perspectivas para el 2014*.
- UPME, U. d. (2004). *una vision del mercado electrico colombiano*. bogota.
- Vasco, U. P. (2001). *Analisis de la valoraxion de las opciones asiaticas utilizadas por los fondos de inversion garantizados de erenta variable*.
- XM. (2008). *Funcionamiento del mercado OTC de contratos forward de electricidad en colombiana*. Boletin XM.

## Anexos

Tabla 1. Correlograma sobre Precio de Energia

Sample: 1 5425  
Included observations: 5425

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.970	0.970	5195.1	0.000	
2	0.962	0.106	16216	0.000	
3	0.946	0.024	15674	0.000	
4	0.924	0.083	19668	0.000	
5	0.923	0.042	24428	0.000	
6	0.912	0.032	28954	0.000	
7	0.903	0.027	32384	0.000	
8	0.897	-0.145	37468	0.000	
9	0.872	-0.009	41798	0.000	
10	0.881	0.083	48828	0.000	
11	0.852	0.030	49768	0.000	
12	0.847	0.086	52822	0.000	
13	0.842	0.044	57548	0.000	
14	0.834	-0.058	61328	0.000	
15	0.822	-0.070	63808	0.000	
16	0.810	0.001	68578	0.000	
17	0.802	0.026	72874	0.000	
18	0.793	-0.007	75508	0.000	
19	0.796	0.007	78861	0.000	
20	0.780	0.056	82178	0.000	
21	0.774	0.029	85437	0.000	
22	0.765	-0.019	88624	0.000	
23	0.757	0.016	91748	0.000	
24	0.751	0.009	94822	0.000	
25	0.747	0.036	97888	0.000	
26	0.742	0.004	100865	0.000	
27	0.740	0.026	103900	0.000	
28	0.738	0.088	106822	0.000	
29	0.733	-0.041	109752	0.000	
30	0.727	-0.035	112636	0.000	
31	0.720	-0.027	115466	0.000	
32	0.716	0.046	119267	0.000	
33	0.714	0.034	121046	0.000	
34	0.712	0.032	123826	0.000	
35	0.711	0.014	126578	0.000	
36	0.704	-0.083	129289	0.000	

Tabla 2. Correlograma sobre Variaciones Precio de la Energia Electrica

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	-0.381	-0.381	170.53	0.000	
2	-0.073	-0.119	207.98	0.000	
3	-0.091	-0.321	243.07	0.000	
4	-0.052	-0.107	257.59	0.000	
5	-0.052	-0.114	272.35	0.000	
6	-0.021	-0.093	274.95	0.000	
7	0.225	0.178	546.87	0.000	
8	-0.005	0.057	950.21	0.000	
9	-0.091	-0.098	954.87	0.000	
10	-0.057	-0.057	912.59	0.000	
11	-0.051	-0.099	926.72	0.000	
12	-0.063	-0.100	948.48	0.000	
13	0.020	-0.044	950.81	0.000	
14	0.178	0.085	822.32	0.000	
15	0.008	0.031	822.99	0.000	
16	-0.071	-0.325	850.17	0.000	
17	-0.032	-0.099	865.79	0.000	
18	-0.057	-0.047	873.38	0.000	
19	-0.043	-0.051	883.49	0.000	
20	0.018	-0.033	895.22	0.000	
21	0.169	0.078	1039.7	0.000	
22	-0.004	0.071	1039.8	0.000	
23	-0.005	-0.016	1069.0	0.000	
24	-0.037	-0.015	1066.8	0.000	
25	-0.052	-0.035	1081.5	0.000	
26	-0.058	-0.052	1100.1	0.000	
27	0.015	-0.046	1101.3	0.000	
28	0.159	0.052	1236.7	0.000	
29	-0.006	-0.021	1236.8	0.000	
30	-0.038	-0.001	1247.8	0.000	
31	-0.037	-0.010	1256.8	0.000	
32	-0.057	-0.037	1272.1	0.000	
33	-0.047	-0.041	1283.3	0.000	
34	0.025	-0.024	1287.7	0.000	
35	0.165	0.066	1427.3	0.000	
36	0.005	0.023	1437.1	0.000	

Tabla 3. Prueba raiz unitaria

Null Hypothesis: VARACIONENERGIA has a unit root  
Ergenous: Constant  
Lag Length: 20 (Automatic - based on SIC, maxlags=2)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-18.47325	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.431880	
5% level	-2.851880	
10% level	-2.591993	

\*MacKinnon (1995) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation  
Dependent Variable: D(VARACIONENERGIA)  
Method: Least Squares  
Date: 11/09/14 Time: 20:37  
Sample (adjusted): 22 5424  
Included observations: 5403 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
VARACIONENERGIA(-1)	-2.003339	0.108482	-18.47305	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-1))	0.744022	0.105563	7.048107	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-2))	0.805093	0.102230	5.918931	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-3))	0.477090	0.098797	4.820050	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-4))	0.385186	0.095316	4.040948	0.0001
D(VARACIONENERGIA(-5))	0.108101	0.091222	1.181008	0.2388
D(VARACIONENERGIA(-6))	0.242407	0.088378	2.752274	0.0059
D(VARACIONENERGIA(-7))	0.359853	0.084188	4.275338	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-8))	0.382957	0.078801	4.848255	0.0000
D(VARACIONENERGIA(-9))	0.274939	0.075301	3.631074	0.0003
D(VARACIONENERGIA(-10))	0.182999	0.070875	2.582966	0.0095
D(VARACIONENERGIA(-11))	0.118947	0.065462	1.818805	0.0717
D(VARACIONENERGIA(-12))	0.022393	0.062288	0.359264	0.7209
D(VARACIONENERGIA(-13))	0.008110	0.058845	0.136222	0.8889
D(VARACIONENERGIA(-14))	0.085618	0.052548	1.628606	0.1099
D(VARACIONENERGIA(-15))	0.100367	0.047878	2.096295	0.0391
D(VARACIONENERGIA(-16))	0.062759	0.041953	1.495912	0.1347
D(VARACIONENERGIA(-17))	0.037584	0.035684	1.052039	0.2924

Tabla 4. Prueba Jarque-Bera

Series: VARIACIONENERGIA	
Sample 1 5424	
Observations 5424	
Mean	0.000312
Median	-0.001401
Maximum	0.742374
Minimum	-0.831320
Std. Dev.	0.118016
Skewness	0.132799
Kurtosis	8.511562
Jarque-Bera	6881.216
Probability	0.000000

Tabla 5. Modelo ARMA

Included observations: 5410 after adjustments  
 Convergence achieved after 40 iterations  
 MA Backcast -13 14

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	-0.071259	0.015317	-4.652184	0.0000
AR(2)	-0.110175	0.009962	-11.05917	0.0000
AR(3)	-0.129393	0.014995	-8.629321	0.0000
AR(4)	-0.108616	0.010731	-10.12182	0.0000
AR(5)	-0.071255	0.013736	-5.187572	0.0000
AR(6)	-0.081390	0.010942	-7.438110	0.0000
AR(7)	0.451030	0.050688	8.898217	0.0000
AR(12)	-0.047747	0.012968	-3.681974	0.0002
AR(14)	0.353018	0.048877	7.222585	0.0000
MA(1)	-0.131005	0.018089	-7.242228	0.0000
MA(7)	-0.362707	0.051615	-7.026097	0.0000
MA(3)	0.039015	0.015733	2.479895	0.0132
MA(14)	-0.345692	0.044295	-7.804345	0.0000
MA(21)	-0.029327	0.014571	-2.012732	0.0442
MA(28)	-0.026079	0.013569	-1.921971	0.0547
R-squared	0.177458	Mean dependent var		0.000312
Adjusted R-squared	0.175334	S.D. dependent var		0.118099
S.E. of regression	0.107247	Akaike info criterion		-1.624586
Sum squared resid	62.05343	Schwarz criterion		-1.606298
Log likelihood	4409.506	Hannan-Quinn criter.		-1.618202
Durbin-Watson stat	2.143321			
Inverted AR Roots	.92 .62+ .78i -.22+ .95i -.89+ .42i	.78+ .40i .20+ .87i -.55+ .68i -.89+ .42i	.78+ .40i 20+ .87i -.55+ .68i -.87	.82+ .78i -.22+ .95i -.87
Inverted MA Roots	.89 .80+ .19i .62+ .77i .21+ .89i -.20+ .95i -.55+ .73i -.80+ .18i	.81+ .39i .65+ .51i .36+ .74i .00+ .82i -.36+ .74i .64+ .51i -.87+ .42i	.81+ .39i .65+ .51i .36+ .74i .00+ .82i -.36+ .74i .64+ .51i -.87+ .42i	.80+ .19i .62+ .77i .21+ .89i -.20+ .95i -.56+ .70i -.80+ .18i -.90

Tabla 6. Tabla de Raíces inversas polinomios asociados

AR Root(s)	Modulus	Cycle
0.622670 ± 0.778956i	0.997242	7.009020
-0.217823 ± 0.964608i	0.988896	3.504508
-0.887356 ± 0.424081i	0.983488	2.330758
0.922472	0.922472	
0.198397 ± 0.867358i	0.889759	4.688295
-0.558284 ± 0.680339i	0.880081	2.782669
0.779204 ± 0.397203i	0.874602	13.32819
-0.867350	0.867350	
No root lies outside the unit circle. ARMA model is stationary.		
MA Root(s)	Modulus	Cycle
0.821873 ± 0.766900i	0.987351	7.064131
0.985239	0.985239	
-0.204118 ± 0.950235i	0.971911	3.525148
-0.872304 ± 0.421411i	0.968763	2.334407
0.814665 ± 0.391803i	0.903985	14.01614
0.207439 ± 0.877130i	0.901326	4.693968
-0.896142	0.896142	
-0.555355 ± 0.701141i	0.894437	2.804136
0.645624 ± 0.510932i	0.823336	9.385433
0.355701 ± 0.742079i	0.822924	5.590913
0.801580 ± 0.185941i	0.822864	27.56551
0.004772 ± 0.822218i	0.822231	4.014834
-0.801380 ± 0.179718i	0.821285	2.151053
-0.639690 ± 0.514450i	0.820891	2.549699
-0.357852 ± 0.738896i	0.820810	3.107539
No root lies outside the unit circle. ARMA model is invertible.		



Tabla 7. Test Heterocedasticidad ARCH

Heteroskedasticity Test: ARCH

F-statistic	363.9373	Prob. F(1,5421)	0.0000
Obs*R-squared	341.1674	Prob. Chi-Square(1)	0.0000

Test Equation

Dependent Variable: RESID^2  
 Method: Least Squares  
 Date: 11/15/14 Time: 20:16  
 Sample (adjusted): 2 5424  
 Included observations: 5423 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.010434	0.000534	19.53306	0.0000
RESID(-1)	0.295621	0.013148	19.07718	0.0000

R-squared: 0.082911 Mean dependent var: 0.013028  
 Adjusted R-squared: 0.082738 S.D. dependent var: 0.038172  
 S.E. of regression: 0.036955 Akaike info criterion: -3.757896  
 Sum squared resid: 7.403283 Schwarz criterion: -3.755433  
 Log likelihood: 10191.45 Hannan-Quinn criter.: -3.757017  
 F-statistic: 363.9373 Durbin-Watson stat: 2.036719  
 Prob(F-statistic): 0.000000

Tabla 8. autoregressive conditional heteroskedasticity

Dependent Variable: VARACIONENERGIA  
 Method: ML - ARCH  
 Date: 11/15/14 Time: 14:58  
 Sample (adjusted): 15 5424  
 Included observations: 5410 after adjustments  
 Convergence achieved after 47 iterations  
 MA Backcast: 1 14  
 Pre-sample variance: backcast (parameter = 0.7)  
 GARCH = C(1) + C(12)\*RESID(-1)^2 + C(13)\*GARCH(-1)

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
AR(2)	-0.075719	0.009651	-7.845397	0.0000
AR(3)	-0.069742	0.009358	-7.452282	0.0000
AR(4)	-0.072388	0.009136	-7.923730	0.0000
AR(5)	-0.070689	0.009121	-7.272110	0.0000
AR(6)	-0.030242	0.008684	-4.519083	0.0000
AR(7)	0.446161	0.048439	9.024543	0.0000
AR(14)	0.302505	0.045928	6.588462	0.0000
MA(1)	-0.187949	0.010990	-17.08374	0.0000
MA(7)	-0.350533	0.047241	-7.420116	0.0000
MA(14)	-0.303859	0.042212	-7.198382	0.0000

Variance Equation

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C	8.10E-05	7.20E-06	11.25358	0.0000
RESID(-1)^2	0.099118	0.004713	21.02987	0.0000
GARCH(-1)	0.903342	0.003738	241.8030	0.0000

R-squared: 0.188569 Mean dependent var: 0.000312  
 Adjusted R-squared: 0.187183 S.D. dependent var: 0.118099  
 S.E. of regression: 0.107776 Akaike info criterion: -1.887262  
 Sum squared resid: 62.72479 Schwarz criterion: -1.871412  
 Log likelihood: 5118.044 Hannan-Quinn criter.: -1.881729  
 Durbin-Watson stat: 2.156269

Inverted AR Roots: 94 78+39i -78-39i 62-77i  
 62+77i 19-84i -19+84i -21-95i  
 -21+95i -54-68i -54+68i -87  
 -87+42i -87-42i

Inverted MA Roots: 96 80+38i 80-38i 62+75i  
 62-75i 20+86i 20-86i -20+93i  
 -20-93i -54+69i -54-69i 85-42i  
 -85+42i -87

Tabla 9. Pronostico variaciones precio energía eléctrica (GARCH)

DATO	PRONOSTICOS SERIE
1	08/11/2014 -0,005376633
2	09/11/2014 -0,037412891
3	10/11/2014 0,037689428
4	11/11/2014 0,005683
5	12/11/2014 0,019334404
6	13/11/2014 0,003812709
7	14/11/2014 -0,008127863
8	15/11/2014 -0,011839807
9	16/11/2014 -0,031508406
10	17/11/2014 0,032541299
11	18/11/2014 0,007212382
12	19/11/2014 0,018292026
13	20/11/2014 0,008077061
14	21/11/2014 -0,006132876
15	22/11/2014 -0,010382663
16	23/11/2014 -0,028588655
17	24/11/2014 0,0249764
18	25/11/2014 0,006981498
19	26/11/2014 0,014982473
20	27/11/2014 0,005530945
21	28/11/2014 -0,006196703
22	29/11/2014 -0,010827771
23	30/11/2014 -0,024764151
24	01/12/2014 0,020508915
25	02/12/2014 0,007397203
26	03/12/2014 0,013398654
27	04/12/2014 0,005722552
28	05/12/2014 -0,005460065
29	06/12/2014 -0,010353855
30	07/12/2014 -0,021982868

Tabla 10. Pronósticos Volatilidad GARCH

DATO	PRONOSTICOS VOLATILIDAD
1	08/11/2014 0,005535035
2	09/11/2014 0,005629701
3	10/11/2014 0,005724599
4	11/11/2014 0,005819731
5	12/11/2014 0,005915097
6	13/11/2014 0,006010697
7	14/11/2014 0,006106533
8	15/11/2014 0,006202604
9	16/11/2014 0,006298912
10	17/11/2014 0,006395457
11	18/11/2014 0,006492239
12	19/11/2014 0,00658926
13	20/11/2014 0,006686519
14	21/11/2014 0,006784017
15	22/11/2014 0,006881755
16	23/11/2014 0,006979734
17	24/11/2014 0,007077954
18	25/11/2014 0,007176415
19	26/11/2014 0,007275119
20	27/11/2014 0,007374066
21	28/11/2014 0,007473256
22	29/11/2014 0,00757269
23	30/11/2014 0,007672368
24	01/12/2014 0,007772292
25	02/12/2014 0,007872462
26	03/12/2014 0,007972878
27	04/12/2014 0,008073541
28	05/12/2014 0,008174452
29	06/12/2014 0,008275611
30	07/12/2014 0,00837702

Tabla 11. Pronósticos precio Spot energía eléctrica

Pronósticos		
Dato	Fecha	Precio
1	2014/10/23	\$ 178.9261
2	2014/10/24	\$ 178.3681
3	2014/10/25	\$ 179.9059
4	2014/10/26	\$ 181.1882
5	2014/10/27	\$ 180.5588
6	2014/10/28	\$ 178.9116
7	2014/10/29	\$ 178.7693
8	2014/10/30	\$ 178.7051
9	2014/10/31	\$ 179.5375
10	2014/11/01	\$ 177.6098
11	2014/11/02	\$ 178.1482
12	2014/11/03	\$ 179.8252
13	2014/11/04	\$ 180.0126
14	2014/11/05	\$ 177.9168
15	2014/11/06	\$ 178.9810
16	2014/11/07	\$ 177.6278
17	2014/11/08	\$ 177.9564
18	2014/11/09	\$ 178.7594
19	2014/11/10	\$ 178.7904
20	2014/11/11	\$ 178.4907
21	2014/11/12	\$ 177.8713
22	2014/11/13	\$ 176.0167
23	2014/11/14	\$ 173.7349
24	2014/11/15	\$ 172.5113
25	2014/11/16	\$ 172.1201
26	2014/11/17	\$ 170.5008
27	2014/11/18	\$ 167.6712
28	2014/11/19	\$ 168.0580
29	2014/11/20	\$ 168.6276
30	2014/11/21	\$ 167.7855

Tabla 12. Muestra Aleatoria precios Strike

Simulación	Día 4	Simulación	Día 8	Simulación	Día 12	Simulación	Día 16
705	153.395381	854	149.732546	629	117.661981	515	167.521888
777	164.015353	42	174.877817	462	180.733204	462	182.76737
375	176.294064	490	197.693045	6106	185.92709	195	185.094081
745	181.080216	657	224.138373	904	217.426139	289	206.732027
673	192.515117	651	243.26792	540	226.823885	253	248.30712

Simulación	Día 20	Simulación	Día 24	Simulación	Día 28	Simulación	Día 30
196	182.140994	767	103.723067	416	142.14	269	111.89
16	185.185305	608	107.534599	637	176.530457	101	132.435791
507	188.167835	47	133.249454	314	180.551003	757	149.466382
529	189.958229	595	147.054484	624	205.377847	378	149.610544
949	212.65388	428	183.020424	569	225.208351	18	183.01

Tabla 13. Valoración de Opciones

Día 4						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
174,2254	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
153,395381	30,4668599	6,35554327	28,8565401	4,745223489	26,1878832	0
164,015353	23,6859339	10,1871263	21,7415923	8,242784774	15,5735088	0
176,294064	17,247846	16,0191207	15,0989135	13,87018826	3,30126988	0
181,080216	15,1332642	18,6873276	12,9630793	16,51714269	0	1,48235935
192,515117	10,9062239	25,8871526	8,80639721	23,78732592	0	12,9112331
Día 8						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
200,7262	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
149,732546	53,0167195	4,54318973	33,9574842	6,080757471	29,6475835	0
174,877817	33,8722325	13,411539	19,1016992	16,33491424	4,53322824	0
197,693045	16,1087901	36,1251785	10,4725759	30,48896432	0	18,2539495
224,138373	69,2879654	5,13686247	4,84157543	51,26613608	0	44,6667633
243,26792	6,40647503	71,9337059	2,66540883	68,19263974	0	63,7727912
Día 12						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
171,6233	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
117,661981	64,764105	4,7793023	62,0529953	2,06819269	61,4236406	0
180,733204	27,550019	30,5035639	21,1137784	24,06732333	0	1,52576924
185,92709	25,5294329	33,6659211	19,0449014	27,1813896	0	6,70962345
217,426139	15,9120477	55,4812243	9,86475906	49,43393572	0	38,1478366
226,823885	13,7820348	62,7291587	8,03560507	56,98272901	0	47,5274322
Día 16						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
178,75	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
167,521888	37,5993832	27,2519687	26,8236036	16,47618907	11,5097287	0
182,76737	31,2168423	36,0720998	19,8502726	24,70553005	0	3,69561536
185,094081	30,3363677	37,5118028	18,9305079	26,10594302	0	6,01620081
206,732027	23,2034902	51,9561113	11,9800344	40,73265551	0	27,5971793
248,30712	13,7985553	84,0095269	4,66950537	74,88047696	0	69,0628166
Día 20						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
176,445825	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
182,140994	35,3329713	39,4359725	35,3329713	39,43597252	0	3,20335061
185,185305	34,2003138	41,3369445	21,105441	28,24207171	0	6,25891829
188,167835	33,1251689	43,2338648	19,9807597	30,08945566	0	9,25247656
189,958229	32,4958024	44,3886097	19,330756	31,22356332	0	11,04949
212,65388	25,4766691	59,9854938	12,5655741	47,07439869	0	33,8290589
Día 24						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
154,534543	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
103,723067	81,2849936	7,17258405	81,2849936	7,172584051	74,2728958	0
107,534599	78,5115802	8,1946599	72,6647414	2,347821099	70,4767395	0
133,249454	61,8252012	17,1149012	52,356465	7,646165019	44,8656185	0
147,054484	54,2604265	23,2970497	43,2018546	12,23847785	31,116279	0
183,020424	38,5240356	43,3752161	25,1491447	30,00032516	0	4,7045731
Día 28						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
170,244239	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
142,140972	59,5069372	23,5512623	59,5069372	23,55126228	34,7463701	0
176,530457	44,1480795	42,4130766	30,8945683	29,15956548	0,51968329	0
180,551003	42,6416199	44,9074265	29,2396451	31,50545165	0	3,48182934
205,377847	34,4643435	61,435123	34,4643435	61,43512297	0	28,1911444
225,208351	29,1392705	75,8432093	15,6150325	62,31897124	0	47,9277721
Día 30						
SPOT	Opción Europea		Opción Europea con GARCH		Opción Asiática	
165,276114	CALL	PUT	CALL	PUT	CALL	PUT
111,892222	78,2483068	12,1532377	78,2483068	12,15323773	64,2423966	0
132,435791	65,9098237	20,2502947	56,0574508	10,39792185	43,8032647	0
149,466382	57,1580015	28,4395076	45,6127838	16,89428995	26,8592519	0
149,610544	57,0892014	28,5141107	57,0892014	28,5141107	26,7158236	0
183,011724	43,2622533	47,9127015	29,800416	34,4508642	0	6,51555514

Tabla 14. Escenarios Payoff – Estrategias de cobertura

call

CALL		Estrategias de Cobertura			Mejor Instrumento Cobertura	
DIA	STRIKE	ESTADO	Opcion Europea	Opcion Europea con GAR	Opcion Asiatica	Tipo de Opcion
Dia 4	153,3953808	IN THE MONEY	-9,636840763	-8,026520984	-2,239039075	Opcion Asiatica
	164,0153531	IN THE MONEY	-13,47588694	-11,53154538	-2,244636898	Opcion Asiatica
	176,2940642	IN THE MONEY	-19,31651012	-17,16757764	-2,251109048	Opcion Asiatica
	181,0802162	OUT OF THE MONEY	-21,98808044	-19,8178955	-3,735991195	Opcion Asiatica
	192,5151173	OUT OF THE MONEY	-29,1959412	-27,09611452	-15,17089231	Opcion Asiatica
Dia 8	149,7325462	IN THE MONEY	-2,023065748	17,03616955	2,359795301	Opcion Europea GARCH
	174,877817	IN THE MONEY	-8,023849464	6,746683881	2,328879801	Opcion Europea GARCH
	197,6930455	OUT OF THE MONEY	-13,07563561	-7,439421402	-15,95312049	Opcion Europea GARCH
	224,1383732	OUT OF THE MONEY	-92,70013864	-28,25374863	-42,3984482	Opcion Europea GARCH
	243,2679203	OUT OF THE MONEY	-48,94819535	-45,20712915	-61,52799532	Opcion Europea GARCH
Dia 12	117,6619814	IN THE MONEY	-10,80278634	-8,091676729	1,176944679	Opcion Asiatica
	180,7332041	OUT OF THE MONEY	-36,65992307	-30,22368249	-0,470637451	Opcion Asiatica
	185,9270896	OUT OF THE MONEY	-39,83322242	-33,34869095	-5,66452289	Opcion Asiatica
	217,4261386	OUT OF THE MONEY	-61,71488623	-55,66759761	-37,16357189	Opcion Asiatica
	226,8238845	OUT OF THE MONEY	-68,9826193	-63,23618957	-46,56131783	Opcion Asiatica
Dia 16	167,5218885	IN THE MONEY	-26,37127168	-15,59549211	0,614970292	Opcion Asiatica
	182,76737	OUT OF THE MONEY	-35,23421229	-23,86764254	-3,120782453	Opcion Asiatica
	185,094081	OUT OF THE MONEY	-36,68044876	-25,27458894	-5,447493531	Opcion Asiatica
	206,7320266	OUT OF THE MONEY	-51,18551681	-39,96206098	-27,08543907	Opcion Asiatica
	248,3071203	OUT OF THE MONEY	-83,35567561	-74,22662568	-68,66053281	Opcion Asiatica
Dia 20	182,1409936	OUT OF THE MONEY	-41,02813965	-41,02813965	-4,105454211	Opcion Asiatica
	185,1853049	OUT OF THE MONEY	-42,93979343	-29,84492065	-7,149765506	Opcion Asiatica
	188,1678353	OUT OF THE MONEY	-44,8471788	-31,70276964	-10,13229582	Opcion Asiatica
	189,9582287	OUT OF THE MONEY	-46,00820581	-32,8431594	-11,92268928	Opcion Asiatica
	212,6538801	OUT OF THE MONEY	-61,68472386	-48,77362879	-34,61834062	Opcion Asiatica
Dia 24	103,7230666	IN THE MONEY	-30,47351756	-30,47351756	-3,12798438	Opcion Asiatica
	107,5345988	IN THE MONEY	-31,51163636	-25,66479756	-3,143360226	Opcion Asiatica
	133,2494544	IN THE MONEY	-40,5401129	-31,07137675	-3,247094795	Opcion Asiatica
	147,0544838	IN THE MONEY	-46,7803676	-35,72179572	-3,302784735	Opcion Asiatica
	183,0204237	OUT OF THE MONEY	-67,00991658	-53,63502567	-8,152445614	Opcion Asiatica
Dia 28	142,1409725	IN THE MONEY	-31,40367068	-31,40367068	-5,089407629	Opcion Asiatica
	176,530457	IN THE MONEY	-50,43429752	-37,18078637	-5,252205407	Opcion Asiatica
	180,5510027	OUT OF THE MONEY	-52,9483836	-39,54640876	-8,753067768	Opcion Asiatica
	205,3778466	OUT OF THE MONEY	-69,5979511	-69,5979511	-33,57991167	Opcion Asiatica
	225,2083507	OUT OF THE MONEY	-84,10338219	-70,57914416	-53,41041576	Opcion Asiatica
Dia 30	111,8922216	IN THE MONEY	-24,86441409	-24,86441409	-4,955379289	Opcion Asiatica
	132,4357911	IN THE MONEY	-33,06950041	-23,21712758	-5,05981684	Opcion Asiatica
	149,4663824	IN THE MONEY	-41,34826957	-29,80305188	-5,146395429	Opcion Asiatica
	149,6105437	IN THE MONEY	-41,4236307	-41,4236307	-5,147128303	Opcion Asiatica
	183,0117243	OUT OF THE MONEY	-60,99786328	-47,53602594	-11,83248537	Opcion Asiatica

## Put

SPOT 22/10/2014 177,3989

DIA	PUT		Estrategias de Cobertura			Mejor Instrumento Cobertura
	STRIKE	ESTADO	Opción Europea	Opción Europea con GARCH	Opción Asiática	Tipo de Opción
Día 4	153,395381	OUT OF THE MONEY	-27,18556242	-25,57524264	-23,94884415	Opción Asiática
	164,015353	OUT OF THE MONEY	-20,39717325	-18,45283169	-13,32887192	Opción Asiática
	176,294064	OUT OF THE MONEY	-13,95045657	-11,80152409	-1,050160832	Opción Asiática
	181,080216	IN THE MONEY	-11,83251143	-9,662326494	2,253631845	Opción Asiática
	192,515117	IN THE MONEY	-7,597435283	-5,497608601	2,25965922	Opción Asiática
Día 8	149,732546	OUT OF THE MONEY	-55,53684352	-57,07441126	-32,00737879	Opción Asiática
	174,877817	OUT OF THE MONEY	-39,25992207	-42,18329728	-6,862108044	Opción Asiática
	197,693045	IN THE MONEY	-39,15833303	-33,52211883	-2,300829031	Opción Asiática
	224,138373	IN THE MONEY	18,27531073	-27,85396288	-2,268315142	Opción Europea Desvest
	243,26792	IN THE MONEY	-29,39198562	-25,65091942	-2,244795828	Opción Asiática
Día 12	117,661981	OUT OF THE MONEY	-58,74062091	-56,02951131	-62,60058528	Opción Europea GARCH
	180,733204	IN THE MONEY	-21,3936598	-14,95741921	-1,055131789	Opción Asiática
	185,92709	IN THE MONEY	-19,3621315	-12,87760004	-1,045100555	Opción Asiática
	217,426139	IN THE MONEY	-9,678385786	-3,631097169	-0,984264725	Opción Asiática
	226,823885	IN THE MONEY	-7,528574238	-1,78214451	-0,966114346	Opción Asiática
Día 16	167,521888	OUT OF THE MONEY	-38,48008017	-27,70430059	-12,12469902	Opción Asiática
	182,76737	IN THE MONEY	-32,05472985	-20,6881601	-0,574832903	Opción Asiática
	185,094081	IN THE MONEY	-31,16772182	-19,76186199	-0,568707278	Opción Asiática
	206,732027	IN THE MONEY	-23,97408478	-12,75062895	-0,511740192	Opción Asiática
	248,30712	IN THE MONEY	-14,45240657	-5,323356647	-0,402283779	Opción Asiática
Día 20	182,140994	IN THE MONEY	-33,74080421	-33,74080421	0,902103604	Opción Asiática
	185,185305	IN THE MONEY	-32,59746488	-19,5025921	0,890847215	Opción Asiática
	188,167835	IN THE MONEY	-31,51185489	-18,36744573	0,879819263	Opción Asiática
	189,958229	IN THE MONEY	-30,87620635	-17,71115994	0,873199256	Opción Asiática
	212,65388	IN THE MONEY	-23,77743904	-10,86634397	0,789281733	Opción Asiática
Día 24	103,723067	OUT OF THE MONEY	-57,9840601	-57,9840601	-71,14491145	Opción Europea GARCH
	107,534599	OUT OF THE MONEY	-55,19460374	-49,34776494	-67,33337925	Opción Europea GARCH
	133,249454	OUT OF THE MONEY	-38,39998945	-28,9312533	-41,61852369	Opción Europea GARCH
	147,054484	OUT OF THE MONEY	-30,77710864	-19,71853676	-27,81349431	Opción Europea GARCH
	183,020424	IN THE MONEY	-14,88933505	-1,514444138	3,447872515	Opción Asiática
Día 28	142,140972	OUT OF THE MONEY	-51,65452881	-51,65452881	-29,65696246	Opción Asiática
	176,530457	OUT OF THE MONEY	-36,12685857	-22,87334743	4,732522119	Opción Asiática
	180,551003	IN THE MONEY	-34,60066279	-21,19868795	5,271238432	Opción Asiática
	205,377847	IN THE MONEY	-26,30151537	-26,30151537	5,388767237	Opción Asiática
	225,208351	IN THE MONEY	-20,87909758	-7,354859554	5,482643665	Opción Asiática
Día 30	111,892222	OUT OF THE MONEY	-65,53713044	-65,53713044	-59,28701732	Opción Asiática
	132,435791	OUT OF THE MONEY	-53,09061793	-43,2382451	-38,74344785	Opción Asiática
	149,466382	OUT OF THE MONEY	-44,24923955	-32,70402186	-21,7128565	Opción Asiática
	149,610544	OUT OF THE MONEY	-44,17968135	-44,17968135	-21,56869525	Opción Asiática
	183,011724	IN THE MONEY	-30,17709158	-16,71525424	5,316930222	Opción Asiática