Congreso de Economistas 2006

Banco Central de Reserva del Perú

ESTIMACIÓN DEL PRECIO DE MERCADO DE RIESGO INCORPORADO EN LOS CONTRATOS DE CLIENTES LIBRES DEL MERCADO ELÉCTRICO

David Orosco – OSINERG
Gerardo Tirado
PERÚ

E-mail: dorosco@osinerg.gob.pe, gerard242@gmail.com

1.0 INTRODUCCIÓN

Hace ya más de una década que el sector eléctrico peruano pasó por las reformas estructurales que introdujeron la desregulación de sus actividades y la creación de mercados competitivos. Estas reformas determinaron que alrededor del 50% de la energía eléctrica consumida en el país, pasara a ser transada en el denominado Mercado de Clientes Libres, mercado donde el precio de venta a los clientes finales resulta de un proceso de competencia y libre negociación. Así mismo, se determinó que los precios resultantes de este Mercado Libre, serían el referente para la regulación del precio del otro 50% de la energía consumida; esto es, los precios resultantes de la regulación no podrían variar más allá de una banda de 10% por encima o por debajo de los precios resultantes de la competencia y libre negociación.

Los precios del Mercado de Clientes Libres se consignan en los contratos bilaterales de cada cliente con su suministrador. Estos precios pactados en los contratos son en realidad precios a futuro que tienen como referencia al Precio Spot del mercado en tiempo real, que es administrado por el Comité de Operación Económica del Sistema (COES). Cuando una empresa generadora de energía eléctrica (productor de energía eléctrica) decide contratar la venta de energía con un Cliente Libre, su costo de oportunidad será el Precio Spot, ya que a ese precio podría vender su energía en caso de no realizar el contrato con el cliente, o en todo caso, a ese precio tendría que comprar la energía para venderla a un cliente en caso de no poder producir esa energía.

Así mismo, los precios consignados en los contratos de Clientes Libres se caracterizan por ser estables o amortiguados en el tiempo. De este modo, al contraer un compromiso con precios a futuro estables, el suministrador del Cliente Libre estaría asumiendo el riesgo de la variación del Precio Spot en el futuro. Sin embargo, en concordancia con la relación existente entre el riesgo y el retorno esperado, este riesgo del suministrador será incorporado en el contrato elevando el retorno esperado del mismo (premio de riesgo), a través del incremento del precio a pactar.

El presente trabajo analiza el premio de riesgo que se viene incorporando en los contratos de Clientes Libres del mercado eléctrico. Para lo cual se modela a estos contratos como siendo un Derivado Financiero OTC Exótico, cuyo activo subyacente es el Precio Spot de la energía eléctrica. Se desarrolla una metodología para estimar el precio de mercado del riesgo, el cuál es un factor esencial para estimar el precio de derivados financieros cuyo subyacente es un activo de consumo no almacenable, como es el caso de la energía eléctrica.

El precio de mercado del riesgo es el factor que relaciona el premio de riesgo esperado al negociar un derivado financiero, con la magnitud la volatilidad (riesgo) de ese derivado. En analogía con el *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) -- donde el factor beta define la proporción de la volatilidad (riesgo) del activo que debería ser incorporada en el premio de riesgo esperado para negociar ese activo-- el factor denominado precio de mercado de riesgo, define la proporción de la volatilidad (riesgo) del contrato bilateral de energía eléctrica que debería ser incorporada en el premio de riesgo para negociar ese contrato.

El trabajo está dividido de la siguiente manera, en la Sección 2 se analiza el comportamiento del Precio Spot y se presenta los resultados de la calibración de parámetros de la ecuación diferencial estocástica utilizada para representar este comportamiento. La Sección 3 presenta el marco conceptual necesario para comprender el método de Valuación de Riesgo Neutro para derivados financieros, aspecto fundamental para modelar adecuadamente el riesgo en el contrato bilateral de energía eléctrica. En la Sección 4 se presenta el modelo del contrato bilateral de energía eléctrica como siendo un Derivado Financiero Exótico que tiene como objeto subyacente al Precio Spot de energía eléctrica; este derivado es denominado Forward Asiático-Andino del Precio Spot. En la Sección 5 se presenta la metodología propuesta para estimar el precio de mercado de riesgo utilizando la información de contratos bilaterales existentes. Finalmente, la Sección 6 presenta los resultados obtenidos.

Con este trabajo se busca comprender mejor la dinámica del riesgo inherente a la volatilidad de los precios spot y la transferencia del mismo hacia el precio de los clientes finales en un esquema de mercado competitivo.

2.0 MODELAMIENTO DEL PRECIO SPOT DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El Precio Spot de Energía Eléctrica de un sistema eléctrico, denominado también Costo Marginal de Corto Plazo, está dado por el costo variable de operación de la última central de generación requerida para cubrir la demanda. En un sistema eléctrico como el Peruano, donde se tiene un parque de generación preponderantemente hidráulico[1], este precio se encuentra fuertemente influenciado por las temporadas de lluvias de las cuencas correspondientes. En los periodos de lluvias el Precio Spot tiende a bajar debido a la mayor posibilidad de generación de las centrales hidráulicas.

El Precio Spot de Energía Eléctrica es el precio utilizado en las transacciones entre generadores de un sistema eléctrico interconectado (Indecopi, 2001). A pesar de que se tiene un Precio Spot con valores horarios o diarios, en el Perú no existe un mercado spot horario o diario de energía eléctrica, las transacciones a Precios Spot entre generadores son liquidadas por los agentes de manera mensual a los diez días de vencido el mes a liquidar.

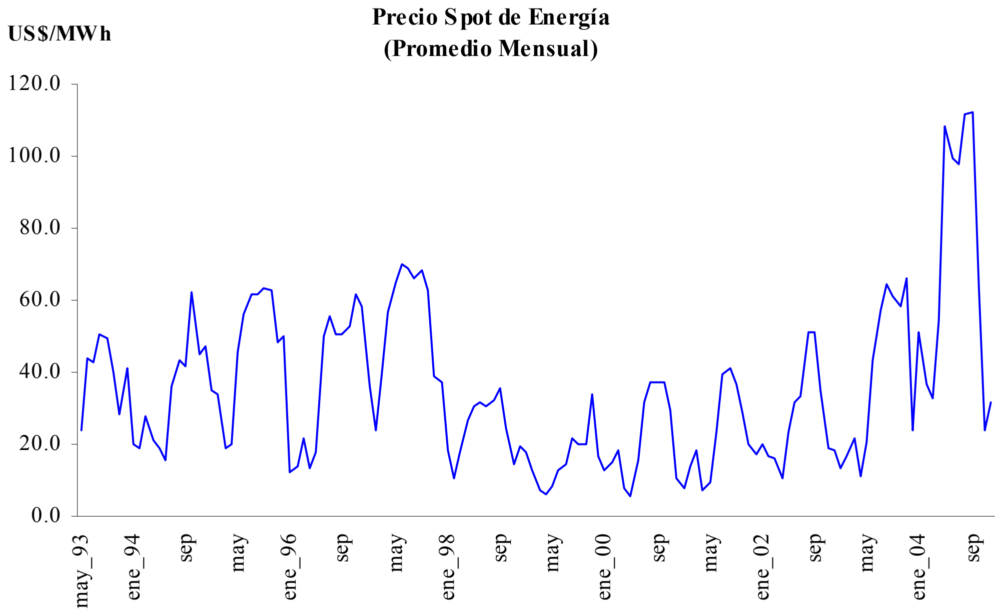
A continuación se analizará el comportamiento del Precio Spot promedio mensual. Este valor es el promedio de los valores horarios, ponderado por el monto de energía transada en la respectiva hora. De este modo se analiza la variable que utilizan los agentes en sus negociaciones habituales. No se ha evaluado el comportamiento del precio spot horario o diario, toda vez que de hacerlo se estaría evaluando distorsiones intra-mensuales que los agentes no visualizan ni incorporan en sus negociaciones.

2.1 Hechos Estilizados del Precio Spot de Energía Eléctrica

A continuación se analiza econométricamente la evolución del Precio Spot promedio mensual para el periodo 1993:05 – 2004:12. El objetivo de esta sección es caracterizar la variable que será usada en el modelamiento del derivado financiero a ser construido más adelante. Para ello, se siguen etapas de identificación del mejor modelo que describe al precio spot de la energía, que van desde la más sencilla como es la observación de la gráfica de la serie, hasta la aplicación de la metodología Box Jenkins.

[1] Aproximadamente el 80% de la energía generada es de origen hidráulico.

Gráfico Nº 1



El gráfico del Precio Spot promedio mensual de la energía eléctrica tiene un comportamiento cíclico que guarda relación con el desarrollo de las temporadas de lluvias, que lo afectan directamente, dado que la mayor parte de la energía eléctrica producida en el Perú, es a través de la generación hidráulica. Ello quiere decir que durante periodos de alta lluvia, el precio tiende a caer, mientras que en periodos de sequía el precio aumenta.

Para analizar la estacionariedad de la serie se realizaron pruebas de raíz unitaria, de acuerdo a los Test de Dickey-Fuller y Phillips-Perrón, con ello es posible encontrar si el Precio Spot de la energía presenta raíz unitaria y, por tanto, inferir acerca de la estacionariedad y el orden de integración de la serie que será utilizada en el modelo. El Cuadro Nº 1, recoge los resultados que calculan las pruebas para el rechazo de la hipótesis nula de existencia de raíz unitaria, que al ser comparados con los valores críticos, rechazan o no, al 1% de significancia, la existencia de una raíz unitaria en la serie analizada. Todos los datos recogidos hasta este momento, y considerando el periodo total de la serie, nos dan indicios a favor de que el precio spot de la energía es una serie estacionaria[2], y por lo tanto, tiene un proceso generador de datos que la caracteriza. Para encontrarlo, utilicemos una metodología de identificación.

Cuadro Nº 1

		Resultado de Pruebas de Raíz Unitarias a P *		
		Intercepto	**Intercepto y Tendencia**	**Ninguno**
1993:05 2004:12	Dickey Fuller	-4.272 *	-4.274 *	0.261
	Phillips Perron	-4.062 *	-4.048 *	-1.959
1996:01 2004:12	Dickey Fuller	-3.847 *	-3.946	-0.042
	Phillips Perron	-3.479	-3.565	-1.970
1998:01 2004:12	Dickey Fuller	-3.265	-2.118	-1.657
	Phillips Perron	-2.923	-3.685	-1.657
2000:01 2004:12	Dickey Fuller	-2.359	-5.211 *	2.483
	Phillips Perron	-2.542	-2.843	-1.296

* Rechazo al 1% de Significancia

[2] No siendo el objetivo principal de la investigación el hacer un análisis exhaustivo de las características de las series, se opta por asumir que ésta es estacionaria para el periodo total.

Entonces, aplicando la metodología desarrollada por Box y Jenkins de identificación del modelo más apropiado para capturar la dinámica del Precio Spot de energía eléctrica, se utiliza un proceso iterativo de estimación y chequeo de las propiedades del modelo. Así, de acuerdo con el correlagrama de la serie, se logra saber que las series se estarían comportando como un Proceso Autoregresivo de Promedio Móvil ARMA (1,1)[3].

Suponiendo acerca de los valores de autoregresión y de medias móviles, se construyen mínimos cuadrados ordinarios para representar el proceso generador de la variable, siendo los parámetros consistentes con las características antes descritas. De acuerdo con los resultados de las simulaciones, se concluye que efectivamente, como se preveía, el Precio Spot de energía eléctrica, sigue un proceso autoregresivo de medias móviles ARMA (1,1). Por ultimo, se realiza el análisis de los residuos del modelo escogido, a través de la visualización del correlograma de los mismos, demostrando que el residuo del modelo está bien comportado.

Dependent Variable: P
Method: Least Squares
Sample(adjusted): 1993:06 2004:12
Included observations: 139 after adjusting endpoints
Convergence achieved after 6 iterations
Backcast: 1993:05

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	35.97122	5.152710	6.981029	0.0000
AR(1)	0.742217	0.068288	10.86890	0.0000
MA(1)	0.250961	0.099354	2.525917	0.0127

R-squared	0.689022	Mean dependent var	35.66058
Adjusted R-squared	0.684449	S.D. dependent var	22.30844
S.E. of regression	12.53152	Akaike info criterion	7.915718
Sum squared resid	21357.32	Schwarz criterion	7.979052
Log likelihood	-547.1424	F-statistic	150.6652
Durbin-Watson stat	1.977879	Prob(F-statistic)	0.000000
Inverted AR Roots	.74		
Inverted MA Roots	-.25		

Finalmente, se identificó que el Precio Spot de energía sigue un proceso ARMA (1,1) y que, por tanto, tienen una estructura como la siguiente:

$$p_t = \mu_p + \beta_1 * p_{t-1} + e_t - \lambda_1 * e_{t-1} \qquad (1)$$

Por ello, se puede concluir que la serie analizada presenta un comportamiento autoregresivo y de medias móviles, es decir, que su valor actual depende del valor que tuvo en el periodo anterior, así como también del término de error rezagado un periodo. Esto nos conduce a inferir acerca de la existencia de perturbaciones que afectan al precio spot de la energía no solo percibidos en el momento actual, sino también (por lo menos) un periodo hacia delante.

2.2 Modelo del Proceso de Difusión del Precio Spot

El modelo utilizado es el propuesto por Schwartz (1997), que modela el precio de la energía eléctrica como un proceso estocástico geométrico con reversión a un valor medio (geometric mean reverting process), y que puede ser representado por la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$d \ln P = \kappa(\alpha - \ln P)dt + \sigma\, dW \qquad (2)$$

---

3 Los cuadros de resultados, los correlogramas y los gráficos de los residuos desarrollados para esta metodología, se muestran en el Anexo Estadístico al final del documento.

Donde,

κ : Velocidad de reversión al valor medio de largo plazo.
α : Valor medio de largo plazo al cual revierte el proceso.
σ : Volatilidad del proceso aleatorio del precio.
dW : Proceso Wiener (distribución normal con media cero y varianza unitaria).

Cabe mencionar que a diferencia del trabajo de Schwartz (1997) y debido a las características de negociación de la energía eléctrica en el Perú, se utilizará este modelo para el precio spot promedio mensual y no para el precio spot instantáneo (diario o semanal). Como ya se mencionó, esto se debe a que en el Perú no existe un mercado spot diario o semanal de energía eléctrica, las transacciones a precios spot son liquidadas mensualmente por los agentes a los diez días de vencido el mes a liquidar.

Se debe anotar también que la metodología de estimación del Precio de Mercado de Riesgo que se presenta en este trabajo, puede ser aplicada también con algún otro modelo estocástico diferente al planteado por Schwartz (1997) sin perder validez. Por ejemplo, se puede plantear un modelo estocástico en el cual la componente de tendencia incorpore el comportamiento marcadamente estacional debido a la temporada de lluvias.

2.3 Calibración de Parámetros

Dado que la Ecuación N° 2 es aplicable para variables en tiempo continuo (valores horarios o diarios), lo que se hace es discretizar dicho modelo de acuerdo a lo expuesto en Clewlow L (2000), y de esta manera aproximar los parámetros de la ecuación diferencial estocástica propuesta por Schwartz (1997). La estacionalidad de la serie analizada en la Sección 2.1 nos garantiza la robustez de los parámetros estimados de acuerdo a la discretización de la mencionada Ecuación N° 2. Para ello hacemos x = lnP, con lo que se tendría:

$$dX = \kappa \cdot (\overline{X} - X)dt + \sigma\, dW \qquad (3)$$

El cual, al ser discretizado se tiene que:

$$\Delta X_t = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot X_t + \sigma \cdot \varepsilon_t, \qquad \varepsilon_t \sim N(0,1) \qquad (4)$$

Donde:

$$\kappa_0 = \kappa \cdot \overline{X} \cdot \Delta t$$

$$\kappa_1 = -\kappa \cdot \Delta t$$

Con lo que se tiene que las observaciones del precio spot en relación con el tiempo pueden ser consideradas como la relación lineal entre X_t y ΔX_t en presencia de un término de error que se supone ruido blanco. Así, una vez obtenidos κ_0 y κ_1, es posible hallar la tasa de reversión a la media “κ“ con $\Delta t = 1/12 = 0.083$.

Entonces haciendo las transformaciones antes mencionadas para la calibración de la tasa de reversión a la media se tiene que:

Dependent Variable: ΔX
Method: Least Squares
Sample(adjusted): 1993:05 2004:11
Included observations: 139 after adjusting endpoints

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.719134	0.180850	3.976416	0.0001
X	-0.212654	0.052635	-4.040137	0.0001

R-squared	0.106460	Mean dependent var	0.001928
Adjusted R-squared	0.099938	S.D. dependent var	0.429278
S.E. of regression	0.407263	Akaike info criterion	1.055568
Sum squared resid	22.72324	Schwarz criterion	1.097791
Log likelihood	-71.36201	F-statistic	16.32270
Durbin-Watson stat	1.674933	Prob(F-statistic)	0.000089

De acuerdo con los resultados: κ_0 = 0.719 y κ_1 = -0.213. Se tiene entonces que el valor medio de largo plazo al cual revierte el proceso es de α = 3.38. Así mismo, la velocidad de reversión a dicho valor medio es de κ = 2.55. Por otro lado, el valor de la volatilidad "σ" se obtiene del error estándar de la regresión (S.E of regresión), en este caso: $\sigma = 0.407 \cdot \sqrt{12} = 1.41$, es decir, se tiene una volatilidad de 141% al año.

Estos resultados indican que el proceso de difusión del Precio Spot, en la medida de probabilidad objetiva o real, tiene un valor medio de largo plazo de $e^{3.38} = 29.37$.

3.0 ARBITRAJE Y PROBABILIDAD DE RIESGO NEUTRO EN LA ESTIMACIÓN DEL PRECIO A FUTURO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En esta sección se presenta el marco conceptual utilizado para modelar adecuadamente el riesgo de los contratos bilaterales de energía eléctrica, analizándolo en el contexto del riesgo de mercado al que se exponen los agentes que participan de estos contratos.

El riesgo de mercado se encuentra asociado a eventuales perjuicios económicos que pueden afectar a las empresas debido a movimientos adversos de los precios de mercado de determinados activos tales como tasas de interés, tasas de cambio, precios de commodities, entre otros (Bodie & Merton, 1999, pág. 284).

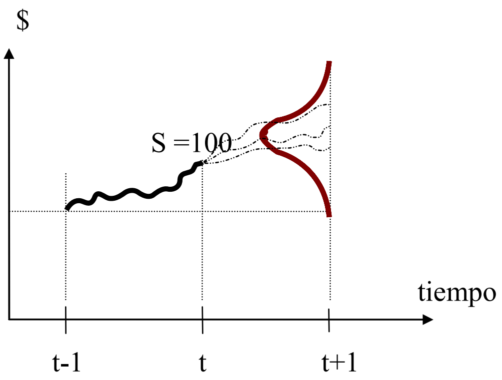
Uno de los conceptos fundamentales utilizado por la teoría financiera para el modelamiento del Riesgo de Mercado, es la Ley del Precio Único, también conocida como Ley de No Arbitraje (Bodie & Merton, 1999, pág. 171). De acuerdo con la Ley de No Arbitraje, el precio a futuro o precio esperado de un activo incierto, no se encuentra determinado por la Ley de los Grandes Números, ya que ésta sólo sugiere un valor probable de acuerdo con probabilidades históricas. El precio esperado de un activo incierto se encuentra en realidad determinado por un mecanismo completamente diferente, que está asociado a las oportunidades de arbitraje de precios que los agentes económicos pueden aprovechar y que fuerzan un precio de equilibrio esperado (Baxter & Rennie, 1996, pág. 7,8).

3.1 Las Fuerzas del Mercado en la Formación del Precio a Futuro

A continuación se presenta un ejemplo de cómo las fuerzas del mercado, mediante la posibilidad de arbitraje, determinan el precio a futuro de una acción cotizada en Bolsa; compararemos este precio con aquel que erróneamente se podría obtener si se intentara utilizar la Ley de los Grandes Números. Este ejemplo servirá para introducir luego el concepto de valor esperado (expectation) en la medida de probabilidad de riesgo neutro.

Gráfico Nº 2

Proceso de Difusión del Precio de una Acción



Asumamos que se tiene una acción cuyo precio el día de hoy (fecha "t") es \$100, S_t = 100. ***¿Cuál debería ser el precio, hoy, al que debería pactarse un contrato de compra de esa acción, que será entregada en una fecha futura (fecha "t+1")?***

Asumamos también que el precio de la acción S_t responde a un proceso de difusión estocástico del tipo Log-normal (Hull, 2000, Pág. 237), como el de la expresión a continuación:

$$dS = \mu \cdot S \cdot dt + \sigma \cdot S \cdot dW \qquad (5)$$

Donde,

S: Precio de la acción.

μ: Tasa de retorno esperado del precio de la acción.

σ: Volatilidad del precio de la acción.

Entonces, si intentáramos utilizar la Ley de los Grandes Números para responder a esta pregunta, el valor del precio a pactar estaría dado por la siguiente expresión:

$$\text{Precio a Pactar} = \exp(-r\Delta t)\cdot \mathrm{E}\left[S_{t+1} \mid S = S_t\right] \quad (6)$$

Donde:

exp(-rΔt) : Factor del valor del dinero en el tiempo (“trae” el flujo en la fecha “t+1” hacia la fecha “t”), a una tasa de descuento “r”.

E[S_{t+1} | S=S_t] : Valor esperado de “S” en “t+1”, dado que el valor hoy es “S_t” (expectancia condicional)

Este último factor E[S_{t+1} | S=S_t], es el denominado valor esperado (expectancia) de una variable aleatoria, que puede ser estimado utilizando por ejemplo un método numérico como la simulación Montecarlo. Sin embargo, para el caso del precio de la acción del ejemplo planteado, el valor esperado también puede ser solucionado analíticamente[4], resultando (Hull, 2000, Pág. 239):

$$\mathrm{E}\left[S_{t+1} \mid S = S_t\right] = S_t \exp(\mu \cdot \Delta t) \quad (7)$$

De este modo, según la Ley de los Grandes Números, el precio a pactar hoy (fecha “t”) por una acción a ser entregada en el futuro (fecha “t+1”) sería:

$$\text{Precio a Pactar} = \exp(-r\Delta t)\cdot S_t \exp(\mu \cdot \Delta t) \quad (8)$$

No obstante parecer razonable el valor del precio a futuro obtenido por la Ley de los Grandes Números, a continuación se demostrará que la posibilidad de arbitraje de precios en el mercado, genera un mecanismo que fuerza un precio a futuro de equilibrio, que no guarda ninguna relación con el valor encontrado por la Ley de los Grandes Números.

Volvamos entonces a la pregunta inicialmente planteada respecto a cuál debería ser el precio hoy, fecha “t”, al que debería pactarse un contrato de compra de una acción que será entregada en una fecha futura “t+1”. El precio correcto por ese contrato es:

$$\text{Precio Correcto a Pactar} = S_t \exp(r \cdot \Delta t) \quad (9)$$

Nótese que este valor no depende del valor esperado del precio, y menos aún de la distribución de probabilidades que tenga el precio de la acción. Este valor resulta de la posibilidad de arbitraje de precios que puede ejecutarse mediante la construcción de un portafolio replicante. Expliquemos esto en detalle a continuación.

Consideremos la posición de un eventual vendedor del contrato, obligado a entregar la acción en la fecha futura “t+1” a cambio de alguna cantidad de dinero en ese momento de entrega. Este agente podría hoy tomar prestado del sistema financiero una cantidad como S_t, comprar la acción con esa cantidad, tenerla a buen recaudo y tan sólo esperar. Cuando llegue el momento de ejecutar el contrato, momento “t+1”, él debería pagar la deuda, que a una tasa de descuento de capitalización continua “r”, resultaría en un monto de $S_t \exp(r \cdot \Delta t)$; con esto el agente ya tendría la acción lista para ser entregada. Entonces, cada vez que se presente la oportunidad de vender el contrato en mención a un precio mayor al valor de $S_t \exp(r \cdot \Delta t)$,

[4] Esto se debe a que la función de densidad de probabilidades de una variable normalmente distribuida es ampliamente conocida y fácilmente integrable.

el agente lo hará obteniendo una ganancia si haber corrido ningún riesgo, es decir habrá arbitrado el precio a futuro de la acción. Esta posibilidad de arbitraje del vendedor, forzará a que el precio a futuro no sea superior al valor de $S_t \exp(r \cdot \Delta t)$. La misma posibilidad de arbitraje del lado contrario, forzará a que el precio a futuro no sea inferior al valor de $S_t \exp(r \cdot \Delta t)$. Por lo tanto, el mecanismo de arbitraje estará forzando un precio de equilibrio de $S_t \exp(r \cdot \Delta t)$, valor que es totalmente distinto al propuesto por la Ley de los Grandes Números mostrado en la Ecuación N° 8.

El mecanismo de arbitraje, cuando es analizado en el contexto del mercado eléctrico, nos lleva a una conclusión que amerita ser resaltada: sería un error pretender determinar correctamente el precio a futuro del precio spot de energía eléctrica, aplicando por ejemplo una metodología como Monte Carlo pero basados en la probabilidad histórica (también llamada probabilidad objetiva) de ocurrencia de estos precios o de las variables determinantes del mismo (cotas de embalses, precios de combustibles, demanda, u otros).

Surge entonces la necesidad de trabajar con otra medida de probabilidad sobre la cual estimar los valores esperados con metodologías como Monte Carlo. Pero a diferencia de la medida de probabilidad histórica u objetiva, esta nueva medida de probabilidad deberá ser coherente con la Ley de No Arbitraje. Esta nueva medida de probabilidad es la que se encuentra implícita en el concepto de Valuación de Riesgo Neutro que se explica a continuación.

3.2 Valuación de Riesgo Neutro

La Valuación de Riesgo Neutro es definitivamente la herramienta más importante en el análisis de derivados financieros. Su concepción resultó de evidenciar que las ecuaciones que expresan el precio de derivados financieros sobre acciones, tales como Forwards e incluso Options de acciones, no incorporan ninguna variable que sea afectada por el grado de aversión al riesgo de los agentes involucrados en su negociación. Entonces, si las preferencias de riesgo de los inversionistas no entran en la ecuación, éstas no pueden afectar la solución. Por lo tanto, cualquier conjunto de preferencias de riesgo puede ser utilizada para evaluar el precio de un derivado. Específicamente, puede hacerse un supuesto muy conveniente: se puede asumir que todos los inversionistas son neutrales al riesgo (Hull, 2000, Pág. 248).

Este supuesto de inversionistas neutrales al riesgo es meramente un artificio para simplificar la obtención de la ecuación del precio de un derivado. Las soluciones obtenidas en un mundo de riesgo neutro, son también válidas para cualquier conjunto de preferencias de riesgo que se encuentre en el mundo real. En el ejemplo de derivados sobre acciones (Forwards u Options), cuando nos movemos de un mundo de riesgo neutro a un mundo con aversión al riesgo, cambian dos cosas: cambia la tasa de retorno esperado de la acción, pero también cambia la tasa de descuento a utilizar para descontar los flujos en el tiempo. Pues sucede que estos dos cambios se compensan mutuamente de manera exacta (Hull, 2000, Pág. 249).

Al asumir que los inversionistas son neutrales al riesgo, el problema de determinar el precio de un derivado se simplifica considerablemente. En un mundo donde los inversionistas son neutrales al riesgo, la tasa de retorno de cualquier activo o contrato, es la tasa libre de riesgo “rf”. La razón es que los inversionistas neutrales al riesgo no requieren un premio de riesgo que deban transferir a su tasa de retorno esperada. Así mismo, en un mundo de riesgo neutro, el valor presente de cualquier flujo de dinero puede ser obtenido descontando el valor esperado de ese flujo, a la tasa libre de riesgo.

Entonces, en un mundo de riesgo neutro el valor de cualquier contrato derivado, puede ser formulado utilizando el siguiente procedimiento (Hull, 2000, Pág. 249):

1. Se asume que la tasa de retorno esperada del activo subyacente al derivado, es la tasa libre de riesgo “rf”. Esto implica cambiar la medida de probabilidad del proceso de difusión del activo subyacente. Es decir, implica dejar la medida de probabilidad real u objetiva (que está asociada al grado de aversión al riesgo del inversionista) y trabajar con la medida de probabilidad de riesgo neutro.

2. Se calcula el valor esperado (expectancia) del resultado (payoff) del derivado en análisis pero sobre la base del proceso de difusión del activo subyacente en la medida de probabilidad de riesgo neutro.

3. Se descuenta el valor esperado del resultado del derivado a la tasa libre de riesgo.

A continuación demostraremos cómo, utilizando este procedimiento del párrafo anterior, se puede obtener el valor correcto del precio al cual debería pactarse un contrato de compra de una acción que será entregada en una fecha futura; ejemplo planteado en la sección 3.1. Este contrato es un derivado ampliamente conocido y denominado como Forward.

Primero, debemos trabajar sobre la medida de probabilidad de riesgo neutro, lo cual implica reformular el proceso de difusión planteado en la Ecuación N° 5, de la siguiente manera:

$$dS^* = rf \cdot S^* \cdot dt + \sigma \cdot S^* \cdot dW^* \qquad (10)$$

Nótese que para el caso de las acciones, la única diferencia entre el proceso de difusión en la medida de probabilidad objetiva (real) y el proceso en la medida de probabilidad de riesgo neutro, es que la tasa de retorno esperado de la acción es la tasa libre riesgo "rf".

A continuación analicemos el resultado (payoff) del contrato Forward. Una posición de compra de un contrato Forward, al momento de ejecutarlo, tendrá el siguiente resultado (payoff):

$$S_{t+1} - K$$

Donde:

S_{t+1}: es el precio alcanzado por la acción al momento de ejecutar el contrato; y

K: es el precio de transferencia acordado por las partes en el momento de la firma del contrato.

Entonces el valor esperado del resultado en la medida de probabilidad de riesgo neutro tendrá la siguiente forma:

$$\mathrm{E}^*\left[S_{t+1} - K \mid S = S_t\right]$$

Donde:

$\mathrm{E}^*[\,(.) \mid S=S_t\,]$: Es el operador de valor esperado (expectancia) condicional, pero en la medida de probabilidad de riesgo neutro.

Finalmente, el valor del contrato Forward planteado, es el valor esperado en la medida de probabilidad de riesgo neutro, descontado a la tasa libre de riesgo. Si denotamos el valor de este contrato Forward como *f*, entonces tendremos que:

$$f = \exp(-rf \cdot \Delta t) \cdot \mathrm{E}^*\left[S_{t+1} - K \mid S = S_t\right] \qquad (11)$$

Dado que "K" es constante, la ecuación anterior puede ser expresada como:

$$f = \exp(-rf \cdot \Delta t) \cdot \mathrm{E}^*\left[S_{t+1} \mid S = S_t\right] - K \cdot \exp(-rf \cdot \Delta t) \qquad (12)$$

Por otro lado, utilizando la Ecuación N° 7, pero esta vez en la medida de probabilidad de riesgo neutro, se tiene que $\mathrm{E}^*\left[S_{t+1} \mid S = S_t\right] = S_t \exp(rf \cdot \Delta t)$; por lo que la ecuación anterior queda reducida a:

$$f = S_t - K \cdot \exp(-rf \cdot \Delta t) \qquad (13)$$

Toda vez que el contrato Forward no tiene costo para ninguno de los participantes, entonces el precio correcto a pactar en el mismo, es el valor de "K" que haga nula la Ecuación N° 13. Por lo tanto, el proceso de valuación de riesgo neutro para determinar el correcto precio a pactar en un contrato Forward será de:

$$S_t \exp(r \cdot \Delta t)$$

Como se puede observar en el resultado de esta última expresión, él proceso de Valuación de Riesgo Neutro resulta coherente con la Ley de No-Arbitraje, ya que se obtiene el mismo valor de precio de equilibrio forzado por la posibilidad de arbitraje de los agentes. En la siguiente sección se presentará la aplicación de este proceso de Valuación de Riesgo Neutro para el caso del Precio Spot de energía eléctrica.

3.3 El Proceso de Difusión del Precio Spot en la Medida de Probabilidad de Riesgo Neutro

La posibilidad de arbitraje de precios mediante la construcción de un portafolio que replique la posición de un derivado, de la manera en que se explicó para el caso de un Forward en la Sección 3.1, es intuitivamente comprensible cuando se trata de activos de inversión[5] (Traded Asset) tales como acciones, bonos, oro o plata. En esos casos el activo es fácilmente negociable en el mercado financiero y los costos de almacenamiento son relativamente despreciables. Sin embargo, no se tiene la misma situación en el caso de activos de consumo o commodities (Non-Traded Factor) tales como el cobre, petróleo, o el caso de la energía eléctrica que es un "flow commodity".

El proceso de Valuación de Riesgo Neutro es válido para cualquier tipo de activo, sea este de inversión o de consumo. La diferencia entre ambos casos radica en la naturaleza que toma el proceso de difusión de riesgo neutro del activo subyacente sobre el cual se operará el valor esperado (expectancia). En el caso de los activos de inversión el proceso de difusión de riesgo neutro está básicamente asociado a la tasa libre de riesgo del mercado financiero y para estos casos el grado de aversión al riesgo de los inversionistas no tiene ninguna influencia. No sucede lo mismo en el caso de los activos de consumo, en éstos el proceso de difusión de riesgo neutro del activo subyacente sí se encuentra fuertemente influenciado por el grado de aversión al riesgo de los inversionistas involucrados en su negociación (Ait-Sahalia, 1998, Págs, 77, 81).

Esto quiere decir que el proceso de difusión de riesgo neutro de un activo de consumo incluirá un factor que dependerá del grado de aversión al riesgo de los agentes involucrados en la negociación de dicho activo. Este factor es el denominado Precio de Mercado de Riesgo (λ) y es un valor que no es observable directamente de las series estadísticas, sino que deberá ser leída o inferida de las negociaciones a futuro realizadas por los propios inversionistas. En nuestro caso específico, su valor será extraído de la información de precios pactados en los contratos de empresas generadoras y distribuidoras con Clientes Libres.

De acuerdo con Schwartz (1997), el proceso de difusión de riesgo neutro que corresponde al proceso de difusión planteado en la Ecuación N° 2 (medida de probabilidad real u objetiva), puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$d\ln P^{*} = \kappa((\alpha-\lambda)-\ln P^{*})dt+\sigma\, dW^{*} \qquad (14)$$

Donde,

- κ : Velocidad de reversión al valor medio de largo plazo, obtenido mediante la calibración de parámetros del proceso de difusión en la medida de probabilidad real u objetiva.
- α : Valor medio de largo plazo al cual revierte el proceso, obtenido mediante la calibración de parámetros del proceso de difusión en la medida de probabilidad real u objetiva.
- σ : Volatilidad del proceso aleatorio del precio, obtenido mediante la calibración de parámetros del proceso de difusión en la medida de probabilidad real u objetiva.
- dW^{*} : Proceso Wiener (media cero y varianza unitaria).
- λ : Precio de Mercado de Riesgo, valor a inferir de los precios pactados en los contratos de empresas generadoras y distribuidoras con Clientes Libres.

En la siguiente sección, se desarrollará los conceptos necesarios para modelar los contratos bilaterales de empresas generados y distribuidoras con Clientes Libres, asimilándolos a un derivado financiero OTC del tipo exótico. Ese desarrollo será luego utilizado para explicar la metodología de estimación del precio de mercado de riesgo (λ) en base a los precios pactados en esos contratos.

---

[5] Un activo de inversión es un activo que es poseído con propósitos de inversión por una significante cantidad de inversionistas (Hull, 2000, pág. 50)

4.0 MODELAMIENTO DEL CONTRATO BILATERAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los contratos de suministro de energía a Clientes Libres son acuerdos bilaterales de compra/venta, en los que se pacta el precio a pagar/recibir en los próximos años. El producto transado es la energía eléctrica, expresada en bloques mensuales de consumo, es decir, se realizan liquidaciones mensuales a lo largo de la vigencia del contrato al precio pactado inicialmente.

4.1 Definición del Forward Asiático-Andino

Este contrato de suministro de energía tiene las características básicas de un contrato Forward: es un contrato bilateral[6], se hace un pacto previo del precio del producto para su entrega futura y no existe costo para ninguna de las partes al momento de realizar el contrato. Sin embargo, existe una diferencia sustancial: un contrato Forward convencional se liquida en la fecha pactada y al precio pactado, sin que haya liquidaciones intermedias durante la vigencia del mismo.

En la Ecuación N° 15, se presenta la ecuación del payoff o resultado de un Forward convencional. En ésta se aprecia que el resultado del contrato (payoff) muestra un único valor de liquidación, que corresponde al momento de expiración del contrato.

$$\begin{matrix}\textit{Forward}\\ \textit{Payoff}\end{matrix} = P_T - K \qquad (15)$$

Donde,

P_T : Precio del activo en la fecha de liquidación del contrato.
K : Precio pactado en el momento de la firma del contrato.

En contraposición, el contrato de suministro de energía también tiene un plazo de vigencia o expiración, pero durante su vida va generado liquidaciones mensuales. El resultado (payoff) de este contrato de suministro dependerá entonces del valor que tome el Precio Spot en cada oportunidad de liquidación y no únicamente del precio en la fecha de expiración del contrato. Se puede decir entonces que el resultado (payoff) del contrato de suministro de energía es dependiente del recorrido que vaya tomando el Precio Spot durante la vigencia del mismo.

Existe un tipo de derivado típicamente dependiente del recorrido, que se conoce con el nombre de derivado tipo Asiático. En la Ecuación N° 16 se presenta la ecuación del *payoff* de un Forward del tipo Asiático, en el cual su resultado al momento de expiración del contrato, depende del promedio que haya tomado el precio a lo largo de su vigencia. Pero nótese que en esta expresión aún se tiene un único valor de liquidación (en el momento de expiración del contrato) y no varios como en el caso del contrato de suministro de energía.

$$\begin{matrix}\textit{Asian}\\ \textit{Forward}\\ \textit{Payoff}\end{matrix} = \underset{i=1...T}{\textit{Promedio}}(P_i) - K \qquad (16)$$

Donde,

P_i : Precio del activo en determinado momento "i" a lo largo del periodo de vigencia del contrato.
K : Precio pactado en el momento de la firma del contrato.

Toda vez que en el contrato bilateral existen flujos intermedios, el resultado en el momento de la expiración del contrato bilateral de energía será la sumatoria de esos flujos actualizados a esa fecha, tal como se muestra en la Ecuación N° 17.

---

[6] Por definición el contrato Forward es también un contrato bilateral, ya que no existe una Exchange que elimine el riesgo de crédito de las partes

$$\begin{array}{l}\textit{Resultado}\\ \textit{Contrato}\\ \textit{Bilateral}\end{array} = \sum_{i=1}^{T}\left[(P_i - K)\cdot(1+r)^i\right] \qquad (17)$$

Donde,

P_i : Precio del activo en determinado momento "i" a lo largo del periodo de vigencia del contrato.
r : tasa de interés para actualizar el flujo.

El contrato bilateral de energía tendrá entonces las características de una derivado del tipo exótico, en el cual la expresión de su *payoff* tiene un grado mayor de complejidad en comparación con los derivados convencionales (Wilmott, Howison & Dewynne, 1995, pág. 197).

4.2 Derivación del Modelo del Contrato Forward Asiático-Andino

El valor de un contrato Forward convencional, aquí llamado Tipo Europeo, para el caso de una posición de compra, puede ser visto como el valor esperado, en la medida de probabilidad de riesgo neutro, de la diferencia entre el precio spot del activo y el precio pactado en el contrato, y esto traído a valor presente a la tasa libre de riesgo (Hull, 2000, págs. 249-250). Utilizando la Formula de Feynmac-Kac (Ait-Sahalia, 1998, Pág., 48), ese valor puede representarse como:

$$F(P_0) = E^*\left[\exp\left\{-\int_0^T rf_u du\right\}(P_T - K)\,|P_0\right] \qquad (18)$$

Donde,

P_0 : Precio del activo en el momento de la firma del contrato.
$F(P_0)$: Valor del contrato Forward.
T : Fecha de liquidación del contrato.
rf : Tasa de interés libre de riesgo (risk-free rate).
P_T : Precio del activo en la fecha de liquidación del contrato.
K : Precio pactado en el momento del contrato.

E*[|] : Expectancia condicional, en la medida de probabilidad de riesgo neutro.

Toda vez que este contrato Forward Europeo no tiene costo para ninguno de los participantes, el Valor Forward del activo se encuentra determinado por el valor de "K" que haga cero la Ecuación N° 18. En la sección 3.2 se demostró utilizando esta ecuación, que el valor Forward del precio de una acción S_0, es igual a $S_0 \cdot e^{rf \cdot T}$. (Ait-Sahalia, 1998, Págs., 92,93).

Por lo tanto, el mismo planteamiento puede aplicarse para el Forward Asiático-Andino que, en contraste con el Forward Tipo Europeo, genera flujos periódicos a lo largo de la vida del contrato, que dependen de la diferencia entre el precio spot y el precio pactado. Si usamos la Fórmula Generalizada de Feymac-Kac (Ait-Sahalia, 1998, Págs., 48 y 88), este contrato puede representarse por la siguiente ecuación:

$$f(P_0) = E^*\left[\int_0^T \exp\left\{-\int_0^\tau rf_u du\right\}(P_\tau - K)\,d\tau\,|P_0\right] \qquad (19)$$

Entonces, dado que este contrato tampoco tiene costo alguno para ninguno de los participantes, el precio pactado en la firma del contrato, "K", deberá ser aquel que haga nulo el valor de la Ecuación N° 19. El valor de "K" en este caso, es conocido como el Valor Forward Asiático-Andino del precio spot de la energía eléctrica.

5.0 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL PRECIO DE MERCADO DE RIESGO

Teniendo definido el denominado Forward Asiático-Andino (FAA) de energía eléctrica, podemos explicar a continuación el proceso de estimación del Precio de Mercado de Riesgo (λ) infiriéndolo de los contratos bilaterales existentes.

El Valor Forward Asiático-Andino del precio spot de energía eléctrica es equivalente al precio de compra-venta que se acuerda en un contrato bilateral de energía eléctrica. Por esta razón, se puede tomar una determinada muestra de estos contratos bilaterales y para cada uno de éstos, despejar en base a la

Ecuación N° 19, cuál sería el precio de mercado de riesgo incorporado en el acuerdo de precio de dichos contratos bilaterales. Expliquemos esto en detalle a continuación.

En la Ecuación N° 19, a excepción del valor de "K" que sería conocido e igual al precio pactado en el contrato bilateral, y el valor de "rf" que también sería conocido e igual a la tasa libre de riesgo, el valor esperado dependerá básicamente del proceso de difusión de la variable estocástica P_τ. Pero como ya se ha explicado previamente en la sección 4, de la serie histórica de precios se pueden estimar tres de los cuatro parámetros necesarios para caracterizar este proceso. Solo restaría caracterizar lambda (λ).

Entonces, asumiendo inicialmente un valor de lambda de cero, se utiliza el método de Monte Carlo sobre el proceso de difusión de riesgo neutro del precio spot para encontrar el valor esperado que plantea la Ecuación N° 19. A continuación, mediante un proceso de iteraciones sucesivas (Método de la Secante) sobre el valor esperado, se encuentra el valor de lambda (λ) que haga cero este valor esperado.

De este modo encontraremos un conjunto de valores de lambda (λ), correspondientes a sus respectivos contratos bilaterales.

Sin embargo, es necesario anotar que para que esta estimación tenga resultados apropiados, no puede usarse cualquier contrato entre agentes del sector eléctrico. Los contratos a usar deberán cumplir las siguientes restricciones:

- Deben ser contratos que hayan surgido de un proceso de concurso, de modo que el precio pactado refleje el valor de mercado del precio esperado de la energía eléctrica.
- Los contratos no deberían incluir cláusulas de servicios complementarios o adicionales cuyo costo pueda haber sido incorporado en el precio pactado.
- Los participantes de los contratos deberían ser empresas de reconocida solvencia financiera, para evitar que el precio pactado pueda haber incorporado algún riesgo crediticio o costo financiero de morosidad en la cobranza que sea relevante.

6.0 RESULTADOS OBTENIDOS

Para la aplicación de la metodología descrita en la Sección 5, se utilizó los resultados previos obtenidos en la Sección 2.1, donde se calibró los parámetros de la ecuación diferencial estocástica en la medida de probabilidad objetiva o real. Estos parámetros fueron:

$\alpha = 3.38$	Valor medio de largo plazo al cual revierte el proceso de difusión del Precio Spot.
$\kappa = 2.55$	Velocidad de reversión al valor medio de largo plazo.
$\sigma = 1.41$	Volatilidad del proceso aleatorio del precio

Con base en estos parámetros inicialmente estimados, se utilizó la metodología señalada en la Sección 5, analizando cuatro contratos bilaterales, todos ellos firmados entre empresas generadoras de energía eléctrica y empresas mineras de mediano o grande porte. En el Cuadro N° 3 se presenta la relación de contratos bilaterales utilizados, junto con los valores de lambda encontrados para cada uno de ellos.

Cuadro N° 3
Precio de Mercado de Riesgo (λ)

	Lambda (λ)	Po ctv. US$ / kWh	K ctv. US$ / kWh
Antamina - Edegel	0.13048	16.9	27.66
Perubar - Termoselva	0.41601	61.3	25.50
Ares - Edegel	0.20733	65.9	33.32
Quimpac - San_Gabán	0.30373	10.3	21.66

Fuente: Estimaciones propias

La dispersión encontrada en estos valores de lambda, guarda relación con que:

- El parámetro lambda por definición no es un valor constante, sino que depende del valor del activo subyacente en un determinado momento (Hull, 2000, pág. 500). En este caso, depende del valor del precio spot de la energía eléctrica en el momento de la firma del contrato.
- La suscripción de los contratos bilaterales utilizados no corresponden a un periodo coincidente o cercano el uno del otro.

A continuación se presenta las dos principales interpretaciones, y usos, que se puede dar al factor denominado precio de mercado de riesgo. La sección 6.1 explica la información que el precio de mercado de riesgo encontrado, nos brinda respecto a la relación existente entre el premio de riesgo de un contrato con incertidumbre y la volatilidad del resultado de ese contrato. Por otro lado, la sección 6.2 explica la utilidad del precio de mercado de riesgo encontrado, en la determinación del precio de otros tipos de derivados más complejos (como las opciones) que tienen como activo subyacente al mismo Precio Spot.

6.1 El Precio de Mercado de Riesgo en Analogía con el Capital Asset Pricing Model (CAPM)

El resultado o valor esperado de todo contrato que depende de un activo volátil, tendrá a su vez una volatilidad que depende del comportamiento del activo básico (también llamado activo subyacente). Esta volatilidad del resultado del contrato representa la *cantidad de riesgo* al que se encuentran expuestos los agentes involucrados en su negociación.

La cantidad de riesgo guarda una relación con el resultado o retorno esperado del contrato, la misma que se explica por la siguiente ecuación (Hull, 2000, págs. 498-500):

$$\frac{\mu - rf}{\sigma} = \lambda \qquad (20)$$

Donde,

μ : Retorno esperado del contrato.
rf : Tasa de interés libre de riesgo (risk-free rate).
σ : Volatilidad (riesgo) del contrato.
λ : Precio de mercado de riesgo <u>del activo subyacente al contrato</u>.

Como se puede apreciar en la Ecuación N° 20, el parámetro lambda representa el precio de mercado del riesgo del contrato, ya que el producto de esta cantidad de riesgo (σ) por su precio (λ), representa el premio de riesgo (μ – rf) que los agentes involucrados esperarían tener al involucrarse en la negociación del referido contrato. Cabe mencionar que este precio de mercado de riesgo, es un factor que no depende de las características particulares del contrato, sino que es un valor que resulta de la percepción del mercado respecto al comportamiento del activo subyacente (Hull, 2000, págs. 498-500).

La analogía con el CAPM se puede observar en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} r_i &= rf + \beta \cdot (r_m - rf) \qquad (21) \\ &= rf + \frac{COV(i,m)}{\sigma_m} \cdot (r_m - rf) \\ &= rf + \frac{\rho_{i,m} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_m}{\sigma_m} \cdot (r_m - rf) \\ &= rf + \left[\rho_{i,m} \cdot (r_m - rf)\right] \cdot \sigma_i \end{aligned}$$

Donde,

r_i : Retorno esperado de la acción.
r_m : Retorno esperado del mercado.
rf : Tasa de interés libre de riesgo.
$\rho_{i,m}$: Coeficiente de correlación de la acción respecto al mercado.
σ_i : Volatilidad de la acción.

Entonces, la Ecuación N° 21 (ecuación del CAPM) define la proporción de la volatilidad (riesgo) de la acción, que debería ser incorporada en el premio de riesgo esperado para negociar esa e activo. De igual manera la Ecuación N° 20, del precio de mercado del riesgo, define la proporción de la volatilidad (riesgo) del contrato que debería ser incorporada en el premio de riesgo esperado para negociar ese contrato.

Por lo tanto, haber obtenido resultados que nos indican que el precio de mercado de riesgo del precio spot de energía eléctrica en el Perú se encuentra en el orden de 0.20, significa que el premio de riesgo que se esperaría de un contrato bilateral, sería de 0.20 veces el valor de la volatilidad de este contrato.

Entonces, asumiendo que el contrato bilateral absorbe toda la volatilidad presente en el precio spot de energía eléctrica, que en la Sección 4 se estimó en 141%, se puede estimar que el premio de riesgo esperado por los comercializadores de energía en el Perú, debería encontrarse en el orden de 28%.

6.2 Utilización del Precio de Mercado de Riesgo para Valorizar Derivados Financieros más Complejos

Tal como se explicó en la Sección 3.2, la metodología de valuación de riesgo neutro de derivados financieros requiere trabajar con el proceso de difusión del activo subyacente, pero en la medida de probabilidad de riesgo neutro. Al estimar el valor apropiado del precio de mercado de riesgo del Precio Spot de energía eléctrica, se completa el conjunto de parámetros requeridos para caracterizar la ecuación diferencial estocástica (proceso de difusión) de dicho precio, en la medida de probabilidad de riesgo neutro.

Una vez caracterizada la ecuación del proceso de difusión de riesgo neutro para el Precio Spot, esta ecuación puede ser utilizada para valorizar cualquier tipo de derivado que tenga como objeto subyacente a dicho Precio Spot. Por ejemplo, para el caso de una opción de compra sobre el Precio Spot, la ecuación que determinaría su precio sería una similar a la mostrada en la Ecuación N° 18, en la cual todos los parámetros ya serían conocidos (incluido el precio de mercado de riesgo), y por lo tanto se utilizaría el Método de Montecarlo para encontrar el valor de $f(P_0)$, que representaría el precio a pagar por una opción de compra sobre el Precio Spot de energía eléctrica.

7.0 CONCLUSIONES

Los precios pactados en los contratos bilaterales de energía eléctrica en un mercado desregulado, incorporan un premio de riesgo asociado a la volatilidad del precio spot de energía eléctrica. El marco conceptual y metodológico más apropiado para analizar ese premio de riesgo, es el de la teoría financiera y el de derivados financieros.

Es factible asimilar un contrato bilateral de energía eléctrica a una variante de un contrato tipo Forward. Se ha definido a esta variante como el contrato Forward Asiático-Andino. El término Asiático hace referencia a la característica de “dependencia del recorrido del precio” (path dependent), mientras que el término Andino hace referencia al tipo de contrato bilateral que es muy usado en los mercados eléctricos de los países de la región andina como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina.

Con base en la formulación de la determinación del precio de este contrato Forward Asiático-Andino, se ha desarrollado una metodología para estimar el precio de mercado de riesgo incorporado en los contratos bilaterales de energía eléctrica existentes.

Los resultados de la aplicación de esta metodología para cuatro contratos bilaterales de energía eléctrica, nos indica que los agentes involucrados en la negociación de los mismos estarían incorporando un valor de premio de riesgo en el orden de 28%.

La metodología y modelos desarrollados abren la posibilidad de estimar el precio correcto de otros tipos de contratos más sofisticados como las opciones o swaps.

REFERENCIAS

Ait-Sahalia, Yacine, 1998, “Financial Engineering: Mathematical Models of Option Pricing & Their Estimations”, University of Chicago’s Material Course (Business 439-01/81).

Baxter, Martin & Andrew Rennie, 1996, “Financial Calculus: An Introduction to Derivative Pricing”, Cambridge University Press.

Bodie Zvi & Robert C. Merton, 1999, “Finanças”, Bookman Companhia Editora (Edición en Portugués)

Clewlow Les, Strickland Chris, 2000, “Energy Derivatives: Pricing and Risk Management”, Lacima Publications.

Hull, John C., 2000, “Options, Futures & Other Derivatives”, Fourth Edition, Prentince Hall.

Indecopi, 2001, Resolución 031-2001-CLC/NDECOPI, Resolución de Autorización a la Operación de Concentración Generada por la adquisición de Electroandes por parte de la empresa PSEG Global Inc.

Schwartz, E., 1997. “The stochastic behavior of commodity prices: implications for valuations and hedging”, Journal of Finance, vol. 52(3), 923-973.

Villaplana, Pablo, 2005, “Pricing Power Derivatives: A Two Factor Jump-Diffusion Approach”, Paper in progress, Universitat Pompeu Fabra.

Wilmott, Paul, Sam Howison, Jeff Dewynne, 1995, “The Mathematics of Financial Derivatives, A Student Introduction”, Cambridge University Press.

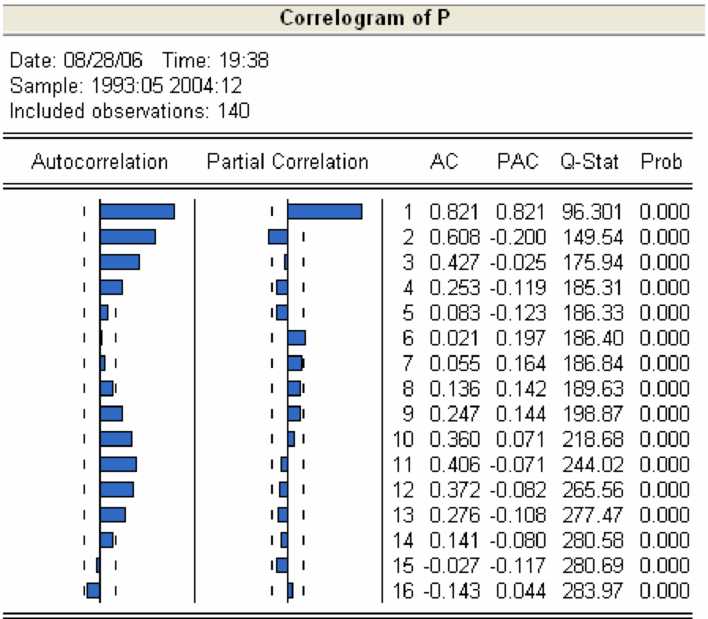
ANEXO ESTADISTICO

A continuación se presentan los cuadros y gráficos que se utilizaron como referencia para el modelamiento del proceso generador de datos del precio spot promedio mensual.

Cuadro N° 1
Precio Spot de Energía Eléctrica
(Promedio Mensual)

Media	35.58
Mediana	31.63
Máximo	112.39
Mínimo	5.81
Desv. Estándar	22.25
Skewness	1.16
Kurtosis	4.54
Jarque Bera	44.96
Probabilidad	0.00
N° Observaciones	140

[1] Periodo: 1993.05 2004.12 Fuente: Osinerg


Correlogram of P

Date: 08/28/06 Time: 19:38
Sample: 1993:05 2004:12
Included observations: 140

Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.821	0.821	96.301	0.000
		2	0.608	-0.200	149.54	0.000
		3	0.427	-0.025	175.94	0.000
		4	0.253	-0.119	185.31	0.000
		5	0.083	-0.123	186.33	0.000
		6	0.021	0.197	186.40	0.000
		7	0.055	0.164	186.84	0.000
		8	0.136	0.142	189.63	0.000
		9	0.247	0.144	198.87	0.000
		10	0.360	0.071	218.68	0.000
		11	0.406	-0.071	244.02	0.000
		12	0.372	-0.082	265.56	0.000
		13	0.276	-0.108	277.47	0.000
		14	0.141	-0.080	280.58	0.000
		15	-0.027	-0.117	280.69	0.000
		16	-0.143	0.044	283.97	0.000

Se presentan las ecuaciones que se construyeron para la elección de la mejor representación de la serie, para ello, se utilizó el criterio de Schwarz como el indicador que determine la elección del modelo.

Dependent Variable: P
Method: Least Squares
Date: 08/28/06 Time: 23:04
Sample(adjusted): 1993:06 2004:12
Included observations: 139 after adjusting endpoints
Convergence achieved after 3 iterations

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	35.90421	6.042790	5.941661	0.0000
AR(1)	0.820768	0.048679	16.86073	0.0000

R-squared	0.674804	Mean dependent var	35.66058
Adjusted R-squared	0.672430	S.D. dependent var	22.30844
S.E. of regression	12.76795	Akaike info criterion	7.946037
Sum squared resid	22333.81	Schwarz criterion	7.988260
Log likelihood	-550.2496	F-statistic	284.2843
Durbin-Watson stat	1.637291	Prob(F-statistic)	0.000000
Inverted AR Roots	.82		

Dependent Variable: P
Method: Least Squares
Date: 08/28/06 Time: 23:09
Sample(adjusted): 1993:06 2004:12
Included observations: 139 after adjusting endpoints
Convergence achieved after 6 iterations
Backcast: 1993:05

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	35.97122	5.152710	6.981029	0.0000
AR(1)	0.742217	0.068288	10.86890	0.0000
MA(1)	0.250961	0.099354	2.525917	0.0127

R-squared	0.689022	Mean dependent var	35.66058
Adjusted R-squared	0.684449	S.D. dependent var	22.30844
S.E. of regression	12.53152	Akaike info criterion	7.915718
Sum squared resid	21357.32	Schwarz criterion	7.979052
Log likelihood	-547.1424	F-statistic	150.6652
Durbin-Watson stat	1.977879	Prob(F-statistic)	0.000000
Inverted AR Roots	.74		
Inverted MA Roots	-.25		

Dependent Variable: P
Method: Least Squares
Date: 10/27/06 Time: 09:06
Sample(adjusted): 1993:07 2004:12
Included observations: 138 after adjusting endpoints
Convergence achieved after 3 iterations

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	35.45747	3.879740	9.139137	0.0000
AR(2)	0.609291	0.067956	8.965949	0.0000

R-squared	0.371500	Mean dependent var	35.60034
Adjusted R-squared	0.366879	S.D. dependent var	22.37836
S.E. of regression	17.80622	Akaike info criterion	8.611360
Sum squared resid	43120.36	Schwarz criterion	8.653783
Log likelihood	-592.1838	F-statistic	80.38824
Durbin-Watson stat	0.813413	Prob(F-statistic)	0.000000
Inverted AR Roots	.78	-.78	

Dependent Variable: P
Method: Least Squares
Date: 10/27/06 Time: 09:10
Sample(adjusted): 1993:07 2004:12
Included observations: 138 after adjusting endpoints
Convergence achieved after 12 iterations
Backcast: 1993:06

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	35.40966	5.878176	6.023920	0.0000
AR(2)	0.658253	0.081443	8.082347	0.0000
MA(1)	0.859800	0.056736	15.15450	0.0000

R-squared	0.682831	Mean dependent var	35.60034
Adjusted R-squared	0.678133	S.D. dependent var	22.37836
S.E. of regression	12.69600	Akaike info criterion	7.941950
Sum squared resid	21760.43	Schwarz criterion	8.005586
Log likelihood	-544.9946	F-statistic	145.3205
Durbin-Watson stat	1.712095	Prob(F-statistic)	0.000000
Inverted AR Roots	.81	-.81	
Inverted MA Roots	-.86		

De acuerdo con los índices de Schwarz de las ecuaciones dadas[7], el mejor modelo que representa el proceso generador del precio spot promedio mensual es el ARMA (1,1) el cual tiene la forma:

$$p_t = \mu_p + \beta_1 p_{t-1} + e_t - \lambda_1 * e_{t-1}$$

Siendo el mejor modelo el escogido, su residuo debería estar bien comportado, lo cual se puede ver en el correlograma del mismo.

[7] Se escoge el modelo que tenga el menor índice de Schwarz

Correlogram of Residuals

Date: 10/27/06 Time: 10:25
Sample: 1993:06 2004:12
Included observations: 139
Q-statistic probabilities adjusted for 2 ARMA term(s)

Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.003	0.003	0.0009	
		2	0.042	0.042	0.2505	
		3	0.043	0.043	0.5214	0.470
		4	0.084	0.083	1.5525	0.460
		5	-0.212	-0.218	8.1518	0.043
		6	-0.155	-0.171	11.696	0.020
		7	-0.045	-0.038	11.999	0.035
		8	-0.039	-0.011	12.231	0.057
		9	0.006	0.070	12.237	0.093
		10	0.185	0.196	17.453	0.026
		11	0.175	0.142	22.116	0.009
		12	0.156	0.124	25.854	0.004