

APLICACIÓN DE LA TEORÍA FINANCIERA PARA ESTABLECER ESTRATEGIAS DE COBERTURA DEL RIESGO DE DÉFICIT DE SUMINISTRO Y PRECIO DE ELECTRICIDAD

*Miguel Flores Ortega**

RESUMEN. Se presenta la investigación realizada en el marco de referencia del suministro de energía eléctrica, para evaluar portafolios de cobertura de riesgo de suministro y variación del precio, al considerar condiciones cambiantes y el efecto de decisiones estratégicas para la aplicación de recursos económicos en la producción de electricidad en México.

Con un enfoque que va de lo particular a lo general, se analiza la aplicación de opciones reales para modelar el efecto de los contratos de suministro de combustibles, y evaluar las estrategias de cobertura del riesgo, déficit de suministro de electricidad. Se propone el diseño de estrategias de cobertura integradas en portafolios para reducir el riesgo-precio y déficit de suministro.

ABSTRACT. This paper presents the investigation realized in the frame of reference of the supply of electric power, to evaluate portfolios of coverage of risk of supply and variation of the price on having considered changeable conditions and the effect of strategic decisions for the application of economic resources in the production of electricity in Mexico.

With an approach that goes from the particular thing to the general thing, it is analyzed the application of real options to shape the effect of the contracts of supply of fuels, and to evaluate the strategies of coverage of the risk, deficit of supply of electricity. I propose the design of strategies of coverage integrated in portfolios to reduce the risk price and deficit of supply.

* Profesor de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Economía del Instituto Politécnico Nacional.

1. Introducción

La teoría de portafolios, y su aplicación al caso de derivados de electricidad con opciones reales, es el eje central para desarrollar una propuesta para reducir la exposición de riesgos de suministro y la variación de precios de electricidad y consolidar la evaluación de proyectos de inversión, en un entorno de incertidumbre donde se considera el índice de falla de los equipos como indicativo de la confiabilidad de las unidades de generación de electricidad.

Un problema particular del mercado de electricidad es la volatilidad y saltos del precio *spot* de energía eléctrica, el cual cambia conforme varía la demanda y el portafolio de producción. En este mercado se presentan oportunidades únicas de arbitraje al no poder almacenar la energía, el precio *spot* depende del costo de producción, el efecto de falla en los equipos, las curvas de costo de producción de acuerdo a la tecnología empleada y la variación de la demanda de electricidad.

En la determinación del precio de electricidad es muy importante considerar la no linealidad de la curva de consumo específico de cada unidad generadora, ésta es función del nivel de generación y la tecnología utilizada, característica que produce una familia de curvas de consumo específico que se deben aplicar correctamente para la determinación del costo de la energía producida.

En esta investigación el análisis de reestructuración del mercado de electricidad se enfoca a la identificación de nuevos factores de riesgo y las posibilidades de cobertura, por medio de un portafolio para reducir la exposición a los factores de riesgo y mejorar la relación con la expectativa de rendimiento.

El estudio de portafolios de cobertura de los factores de riesgos inherentes al mercado de electricidad, así como los efectos en la variación del precio de la electricidad y el volumen de suministro para mitigar apagones son temas de actualidad e interés para la economía mundial. Desde el punto de vista académico, el tema de cobertura del riesgo presenta una línea de investigación de gran relevancia y actualidad, que poco se ha desarrollado y difundido en México.

En esta investigación se presentan opciones reales de electricidad que tienen en cuenta la flexibilidad de su operación, para realizar decisiones óptimas de inversión en el sistema eléctrico. Para lograr el objetivo se reúnen conceptos avanzados de economía financiera, estadística, investigación de operaciones, ingeniería eléctrica, planeación y simulación para abordar el tema de suministro de electricidad y la evaluación de portafolios de cobertura del riesgo de déficit y de variación de precio, para presentar una aplicación real del mercado de electricidad en México.

Con información real de la demanda de electricidad y el costo de suministros, se analiza el costo horario de producción de electricidad y se valúan las posibilidades de cobertura del riesgo de variación del precio y volumen del suministro de electricidad, para lograr ahorros significativos de largo plazo para la sociedad mexicana.

El concepto de arbitraje se refiere a obtener una utilidad libre de riesgo, en una negociación se explica como un rendimiento libre de riesgo; el concepto mercantil de arbitraje corresponde a comprar un bien subvaluado y venderlo a precio de mercado, situación que se establece con una utilidad libre de riesgo, para que exista arbitraje se debe obtener beneficio de una ineficiencia del mercado.

La reestructuración del sector eléctrico y el ingreso de nuevos participantes presenta la oportunidad de realizar operaciones de mercado y de arbitraje, se puede lograr arbitraje con un solo producto: la energía eléctrica, el combustible o los servicios auxiliares necesarios para la operación del sistema eléctrico.

El costo unitario de producción se calcula al multiplicar el régimen térmico, que es el coeficiente que representa la energía térmica necesaria para producir una unidad de energía eléctrica, por el costo de combustible requerido. La diferencia entre el costo de producción y el precio de mercado de la energía se conoce como opción de diferencia de precios, la opción representa la oportunidad de arbitraje cuando el costo de producción es inferior al precio de mercado, a mayor eficiencia de operación mayor utilidad.

En el caso de un productor de electricidad que no tiene obligación de suministro, puede especular con los acuerdos bilaterales de compra y venta de combustible y realizar arbitraje. Esto ocurre al revender el combustible a un precio mayor al de compra, cuando la utilidad de reventa del combustible es mayor a la de producción de electricidad, condición que promueve el desabasto e incorpora nuevos riesgos al suministro de electricidad.

La dinámica de precios en el mercado de electricidad permite el arbitraje por el diferencial de costos en el suministro de servicios. Con el incentivo de obtener un rendimiento, un generador puede reducir la producción, como consecuencia se incrementan el riesgo y el costo de suministro de electricidad.

Las variables endógenas de investigación que toman un papel preponderante son las que afectan el costo de producción, entre ellas: las políticas operativas, la disponibilidad de los medios de producción, la disponibilidad de suministro de energéticos, la estrategia de utilización de la energía almacenada en los almacenamientos hidráulicos, los programas de mantenimiento y las restricciones físicas de los equipos.

Para el análisis de la distribución de probabilidad de las variables de interés se utilizó el periodo enero de 1994 a diciembre de 2006, ello permite establecer la prueba de la propuesta de cobertura y de la hipótesis seleccionada.

Las variables que afectan la investigación pero no están bajo control de la misma, son: la inflación que afecta los insumos nacionales, y el tipo de cambio tiene un efecto significativo en el costo de producción de electricidad al impactar el costo de suministros y combustibles que se expresan en dólares.

2. Construcción y evaluación de portafolios de cobertura de riesgo déficit y precio de electricidad

En el campo de la economía financiera el término de cobertura de riesgo toma diferentes acepciones de acuerdo al enfoque que se adopte con respecto al

participante en el mercado. En este trabajo, el concepto de cobertura significa limitar la exposición de riesgo por una acción que reduce la exposición a los factores de riesgo, esto a cambio de una reducción de la expectativa del rendimiento del portafolio.

Las técnicas de coberturas como herramientas prácticas de la administración de riesgos para la toma de decisiones que controlen y mitiguen la exposición a los factores de riesgos. La aplicación efectiva de las técnicas requiere mezclar un adecuado conocimiento del sistema eléctrico de potencia y de economía financiera para identificar los factores de riesgo, operativos y de inversión y diseñar una estrategia de coberturas para mitigar los posibles efectos adversos.

Se pone especial atención en el origen y las repercusiones de los factores de riesgo en el mercado eléctrico, en particular los contratos de producción y suministro, para identificar las variables de control relevantes para el diseño de la ingeniería financiera de contratos de producción, suministro de electricidad y combustibles; se desarrollan a su vez estrategias para realizar la cobertura operativa y la administración de los recursos hidroenergéticos, en el caso de las centrales generadoras en embalses con capacidad de regulación.

3. Riesgo en el mercado eléctrico

El modelo de mercado de electricidad en México al igual que en la mayoría de los países, corresponde al de un monopolio natural regulado, el Estado, en México, obliga a la empresa eléctrica a tomar acciones para que cada región satisfaga la demanda de los consumidores. La idea de la intervención de este Estado es garantizar el suministro eléctrico al mínimo costo, el Gobierno Federal, por medio de las Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), controla el precio mediante tarifas. En un gobierno eficiente de otras partes del mundo, la tarifa regula el precio y recupera el costo de operación.

El sector eléctrico mexicano, atrapado en la figura de empresa paraestatal sin autonomía de gestión, sin capacidad de decisión del destino de las

utilidades de operación y sujeto a la obtención de recursos por medio del presupuesto que asigne la SHCP, tiene pocas posibilidades de competencia contra la inversión privada a la que se le han otorgado todas las ventajas a través de concesiones, incluso parte de la exposición de riesgo de la empresa privada se ha trasladado a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los particulares han asumido ventajas adicionales, comparadas con mercados como el de California en los EU, esto explica cómo, en un periodo de 1991 a la fecha, cuenten con más del 25% de la producción que crecerá a más del 60% en los próximos 10 años, como lo presenta el "Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2005-2014", en la sección de inversión comprometida, que se puede consultar en la página electrónica de la empresa o en la de la Secretaría de Energía.

La discusión sobre las bondades y/o errores de la desregulación eléctrica, rebasan de sí el objetivo del trabajo, lo importante es rescatar el comportamiento de los factores de riesgo en el entorno de una empresa que está limitada en obtener recursos para su operación eficiente y su crecimiento, lo que aumenta la exposición de riesgos. El proceso de planeación de la empresa que debe considerar, es el de mayor incertidumbre para poder evaluar el mercado eléctrico en el que fue determinada con precisión la evolución de la demanda, el riesgo en el costo de producción, y las restricciones de suministro aumentan conforme se realiza la descentralización de las decisiones de mantenimiento, condición que afecta la disponibilidad de los equipos que integran el sistema y el costo de producción.

Con la liberación del mercado eléctrico los participantes se enfrentan a riesgos que no existían en la figura de mercado tradicional. En un mercado liberado, el riesgo no sólo es físico, sino también financiero asociado a la volatilidad del precio. Por lo que se presenta entonces un cambio en el ambiente del negocio con la presencia de nuevos contratos utilizados como instrumentos financieros conocidos como productos derivados de electricidad; estos contratos, en principio, se diseñaron para reducir el riesgo financiero como medio de cobertura, sin embargo, al igual que todos los productos derivados existe la forma de utilizarlos como medio para la especulación.

Se debe tener presente que para garantizar el suministro al mínimo costo se requiere la optimización en la utilización de los recursos de generación y transmisión. Como restricciones se asumen las limitaciones físicas de los equipos y las reglas para determinar las reservas estratégicas del sistema para satisfacer la confiabilidad y seguridad del suministro de energía para las expectativas de consumo, tal como se propuso en la sección anterior.

El problema se asocia a la toma de decisiones de producción a partir de las señales aleatorias de los precios en un proceso de maximización de utilidades que corresponde a la toma de decisiones, de acuerdo a opciones de electricidad para seleccionar los generadores que participarán en la producción. La asignación de unidades se realizará con un modelo de opciones de electricidad con la consideración estocástica de los precios de combustible y la posibilidad de fallas en los equipos.

En todos los casos prevalece la pregunta de cómo generar un portafolio óptimo que debe considerar la posición de riesgo de los activos de generación y el riesgo de la empresa eléctrica.

El enfoque de la empresa eléctrica de producción y suministro, cambia bajo el esquema de liberalización de mercado, en el caso de un monopolio regulado la planeación y operación del sistema eléctrico se centraliza, fundamentándose en el principio de minimización del costo de suministro de electricidad, condición que es equivalente a la operación en un mercado de competencia perfecta.

En un mercado desregulado que opera con un enfoque de libre mercado el objetivo esperado de cada participante es el de maximizar su capital, por medio de la creación de valor con la toma de decisiones operativas y de inversión que maximicen el valor de los activos de la empresa y de sus accionistas.

Los contratos bilaterales o multilaterales que describen las nuevas relaciones comerciales del mercado eléctrico, corresponden a acuerdos que implican nuevas presiones y riesgos para el sector eléctrico, este cambio requiere incorporar nuevos paradigmas para el análisis económico de inversión y operación de los sistemas de potencia para lograr la efectiva toma de decisiones de la empresa eléctrica.

4. Factores de riesgo del mercado eléctrico

Los factores de riesgo se clasifican en factores propios del sistema económico y propios de la empresa conocidos como factores no sistémicos. El concepto de riesgo sistémico lo introdujo Markowitz (1952) en su trabajo sobre portafolios y los utilizó Sharpe (1964) para establecer el rendimiento requerido por el capital invertido en la empresa, el riesgo no sistémico describe los riesgos específicos de la empresa, los cuales pueden ser diversificados utilizando un portafolio de inversión para realizar la cobertura de los riesgos no sistémicos.

Riesgo precio. Toda empresa enfrenta el riesgo de movimientos adversos de precio, el caso crítico corresponde cuando el precio no cubre los costos operativos y existe la obligación de suministro, esta condición conduce a pérdidas y en casos extremos a la bancarrota.

Riesgo de volumen o riesgo de capacidad. Dada la naturaleza de los contratos de electricidad que operan en el mercado no controlado existen numerosas y complejas opciones en su contenido, una de ellas, que es la más común, es la cantidad de potencia que se debe suministrar a sus clientes cautivos. Por su parte, el proveedor de los contratos no conoce con frecuencia cuánta energía debe suministrar, esta incertidumbre de capacidad se transforma en un riesgo de precio cuando se establece el volumen requerido.

Stulz (2002) identifica los principales factores de riesgo que inciden en la creación de valor para los accionistas, el aumento de la exposición reduce el valor de la empresa y la capacidad de obtener crédito, los acreedores pueden penalizar el costo de capital durante periodos de incertidumbre financiera, los principales factores son:

El costo de bancarrota. Corresponde a la incertidumbre de que la empresa logre utilidades por la modificación en los costos de transacción, los costos legales y la ineficacia en la aplicación de recursos, este factor se mitiga con la cobertura de la posibilidad de bancarrota cuando el costo de cobertura es menor que el valor presente de la expectativa de bancarrota.

Costo de las nuevas inversiones. Una alternativa para la creación de valor, es la inversión estratégica en maquinaria y capital humano. En la medida en que se establece asimetría en la información, la generación de las utilidades esperadas en un proyecto presenta mayor posibilidad de crear valor, al sustituir financiamiento por reinversión con recursos propios.

Impuestos corporativos. La estructura de los impuestos produce asimetría en los flujos de efectivo al permitir beneficios fiscales de las pérdidas pasadas y futuras, esta condición permite generar valor con la administración del riesgo cuando se aumenta el valor de los flujos de efectivo esperado.

Asimetría de la información. Un problema esencial en las empresas es la postura entre accionistas y administradores donde se presenta asimetría en la información.

5. La estructura de volatilidad en portafolios

La teoría financiera moderna surge con el modelo de portafolio propuesto por Markowitz (1952), en este trabajo se demuestra que el riesgo depende de la varianza de los rendimientos esperados, por lo que la reducción de la varianza del rendimiento de un portafolio lo conduce a la estructura óptima, la teoría asume que los rendimientos presentan una distribución normal y la restricción corresponde al rendimiento esperado, el modelo se utiliza en el mercado financiero y Arrow (1971) presentó la evidencia que consiste en que la reducción de la varianza es una medida adecuada para la reducción del riesgo en el mercado financiero; sin embargo, dicha reducción no es un camino adecuado para establecer la maximización de la función de utilidad esperada.

La cobertura de riesgo en los portafolios del mercado financiero se sustenta en la normalidad de los rendimientos y la reducción de la varianza, con base en esto se determina la función de pérdidas y ganancias que permite el cálculo del indicador valor en riesgo (VaR). Dado que el rendimiento de los activos mercado de electricidad no tienen una distribución normal, la utilización del portafolio de Markowitz para desarrollar coberturas del mercado de electricidad presenta una distribución de rendimientos de colas anchas y la

aplicación del coeficiente VaR no es adecuado para el diseño de estrategias de cobertura en el mercado de electricidad.

6. Selección de inversión en centrales generadoras

La metodología publicada por la Agencia Internacional de Energía de la OCDE analiza el financiamiento de largo plazo, al nivelar costos de inversión y operación e incorpora los paradigmas tecnológicos y el tiempo de construcción.

La metodología de flujos descontados está generalmente aceptada por todos los integrantes de la OCDE como una herramienta válida para realizar la comparación de diferentes tecnologías de producción. Cada compañía aplica su tasa interna de retorno como tasa de oposición para realizar el descuento de los flujos de efectivo, para valorar riesgos se realizan análisis de escenarios para obtener un resultado robusto en la selección de la tecnología de producción de energía eléctrica.

Una empresa con la opción de seleccionar la tecnología de producción que incorpora en su plan de expansión, debe incluir también en su análisis la posibilidades de retrasos de tiempo en la construcción, y valores adicionales en la aplicación de la tecnología, lo que requiere una metodología uniforme para la evaluación económica con reconocimiento y aceptación para la determinación de flujos descontados y observar todos los efectos positivos y negativos de seleccionar cualquier tecnología.

La solución por medio de simulación y análisis probabilístico permite analizar el efecto de la variación en los riesgos asociados al proyecto en relación a los costos futuros y el rendimiento, como resultado se obtienen valores esperados y rangos de variación.

La selección de una tecnología de producción se sustenta en la exploración y la evaluación económica de los flujos de inversión de los siguientes costos:

- Costo de capital. Incorpora: gastos iniciales, intereses durante el periodo de construcción, costos adicionales hasta lograr la condición de operación y los costos de transferencia.

- Costos operativos y de mantenimiento durante la vida útil del equipo.
- Costo esperado de producción. Se basa en el pronóstico del precio del combustible, el nivel de producción, la eficiencia tecnológica, las pérdidas y por el almacenamiento del combustible.
- Producción anual esperada por la disponibilidad de la tecnología.
- Valor presente de los flujos de efectivo de la alternativa en función de la tasa de descuento seleccionada (5-10%).
- Valor presente de la energía producida.
- Nivel del costo de producción. Corresponde a la razón de costo de la energía producida por la capacidad instalada.

7. Cobertura del riesgo de inversión en centrales generadoras

El papel del consumidor en un mercado liberado conduce a la selección del riesgo que se desea asumir en relación a la volatilidad de precios de energía, un consumidor con alternativa de inversión debe considerar dentro del portafolio de inversión la posibilidad del autoabastecimiento y vender sus excedentes al sistema eléctrico o a otros consumidores, cada consumidor tiene la libertad de reaccionar de acuerdo a posibles cambios en los precios de energía y de combustibles.

La apertura del mercado de electricidad se ha enfocado al mercado *spot*, en el cual se comercializa la producción de energía y da lugar a un nuevo paradigma de inversión en plantas generadoras con el propósito de especular con los precios y el valor de la producción.

El diseño de contratos, por un lado entre productores, distribuidores y consumidores a través de alianzas estratégicas, fusiones entre compañías complementarias para reducir el riesgo del precio, y por otro lado los consumidores con la construcción de sus propios medios de suministro para realizar su cobertura, diversifica el riesgo cuando se realizan nuevas inversiones.

La cobertura por medio de contratos

A pesar de que en los mercados financieros no es una práctica común esta figura, para la cobertura de corto plazo la cobertura del riesgo de la volatilidad

de precio, tanto en los consumidores como en los productores se prefiere contar con una cobertura sobre la incertidumbre de la volatilidad de precios a fin de permanecer seguros.

La cobertura del riesgo por medio de contratos entre productores y consumidores es el medio más recomendado para realizar la cobertura de precio y rendimiento.

A la fecha, el desarrollo mundial de contratos de largo plazo se ha visto poco favorecido por el problema de asimetría en las expectativas, sobre todo cuando se vislumbra un periodo de exceso de generación en donde la panorámica de largo plazo no es de incremento de precios.

Determinación de coeficientes de cobertura de riesgo

La determinación de los coeficientes de cobertura identificados por las letras griegas, delta, gamma y vega, permite comprender la estructura de cobertura y la dinámica de evolución del portafolio de cobertura.

La filosofía de cobertura busca remover la exposición al riesgo-precio y limitar el impacto de la variación de las consideraciones del modelo, conforme aumenta el número de productos utilizados en la cobertura se reduce la dependencia de las consideraciones utilizadas en la formulación del modelo.

Para representar cualquier generador se utiliza un conjunto de opciones digitales y opciones de compra por diferencia (*spark-spread*) de valor de una unidad de generación por hora o por día, la expresión general del modelo es:

$$V^n = \sum_{m=1}^M V_m^n \quad (1)$$

donde:

V^n valor del generador n (cualquier generador)

V_m^n valor de la opción de compra unitaria m del generador n

M capacidad del generador n

Bajo esta consideración, el mecanismo más adecuado de cobertura es la utilización de contratos de balance mensual, que tienen la propiedad de realizar una cobertura adecuada porque compensa el efecto de las variaciones del precio de la electricidad.

Coefficiente delta

Es posible determinar el coeficiente de cobertura para cada estado de operación. Se presenta sola la condición de operación de carga base y pico, para que en el caso del coeficiente de operación al pico represente el flujo de efectivo con respecto al valor del contrato a futuro o del contrato de balance mensual, el coeficiente se obtiene al derivar la ecuación de la función de flujo de efectivo mensual con respecto al contrato de energía a futuro que corresponde a la condición de operación al pico o fuera de pico, o el contrato de costo futuro del combustible y se expresa por:

$$\Delta_n^{pico} = \frac{\partial V_0^n}{\partial F_n^{pico}} \quad (2)$$

$$\Delta_n^{base} = \frac{\partial V_0^n}{\partial F_n^{base}} \quad (3)$$

$$\Delta_n^{Combustible} = \frac{\partial V_0^n}{\partial F_n^{combustible}} \quad (4)$$

El reto para realizar la cobertura delta con contratos a futuro es encontrar un soporte sólido de la variación de los precios a futuro y el promedio de la variación del precio *spot* entre los meses subsecuentes para limitar la variabilidad del comportamiento de la cobertura, la solución propuesta es la utilización de los contratos de balance mensual como medio para determinar la cobertura por la correlación de precios para diferentes periodos dentro del mes.

Para realizar la cobertura es necesario conocer el despacho de generación que revela los programas de producción y los costos esperados, dada

la complejidad del problema de optimización dinámica no lineal, en la práctica se aplican modelos heurísticos de despacho, es de vital importancia analizar el efecto de pequeños cambios en el despacho en relación a la sensibilidad de los parámetros de cobertura.

El problema de no linealidad en las curvas de consumo específico, al asumir simplificaciones lineales y puntos críticos, pone de manifiesto la necesidad de alinear las estrategias de despacho con la operación y la cobertura.

Coefficiente gamma

El coeficiente gamma se calcula para cada estado de operación, sólo se presenta para el estado de operación base y pico, en el caso del coeficiente gamma de operación al pico representa la derivada del flujo de efectivo con respecto al valor del contrato a futuro o del contrato de balance mensual, el coeficiente se obtiene de la segunda derivada de la ecuación de la función de flujo de efectivo mensual con respecto al contrato de energía a futuro que corresponde a la condición de operación de pico o fuera de pico, ésta se realiza también para el contrato de costo futuro del combustible.

Los coeficientes gamma se calculan de forma mensual para una unidad de generación que se representan por la expresión:

$$\Gamma_n^{pico} = \frac{\partial^2 V_0^n}{(\partial F_n^{pico})^2} \quad (5)$$

$$\Gamma_n^{base} = \frac{\partial^2 V_0^n}{(\partial F_n^{base})^2} \quad (6)$$

$$\Gamma_n^{gas} = \frac{\partial^2 V_0^n}{(\partial F_n^{gas})^2} \quad (7)$$

El coeficiente gamma se ve afectado por los efectos de la no linealidad de las restricciones de operación, conforme más restricciones se presenten mayor es el valor del coeficiente gamma que se observa, un valor grande del coeficiente gamma se induce por un costo de transacción alto, por el ajuste de las deltas como consecuencia del movimiento de los precios a futuro.

Coeficiente delta cruzado entre pico y base

Dado que el flujo de efectivo que produce la unidad generadora corresponde a la condición de pico y base, es posible aplicar la separación de efectos para mostrar con mayor detalle el riesgo asociado a cada condición y la fuente de valor y su contribución que se expresa por:

$$V_0^n = V_0^{n,pico} + V_0^{n,base} \quad (8)$$

Con la separación es posible determinar los efectos de delta cruzada entre el precio de los contratos a futuro fuera de pico y el flujo de efectivo en las horas pico que ilustran los coeficientes de delta cruzada.

$$\Delta_n^{pico,Base} = \frac{\partial V_0^{n,pico}}{\partial F_n^{base}} \quad (9)$$

$$\Delta_n^{base,pico} = \frac{\partial V_0^{n,base}}{\partial F_n^{pico}} \quad (10)$$

El efecto de cruce se induce por la dependencia de los componentes de flujo de efectivo que se derivan de las condiciones de operación.

Coeficiente delta cruzado entre meses

El modelo seleccionado para la cobertura de generación es un modelo de simplificación del modelo general que asume relación intertemporal entre las decisiones que se toman en un mes con respecto a otro mes y que en este caso es nula, la correlación intertemporal crece conforme la

relación de las restricciones es acumulativa a lo largo de varios meses, el coeficiente delta entre meses se expresa como:

$$\Delta_{n,k}^{pico} = \frac{\partial V_0^n}{\partial F_k^{pico}} \approx 0 \quad (11)$$

Si el coeficiente delta cruzada se aproxima a cero, significa que la correlación intertemporal entre los contratos a futuro no tiene impacto en la evaluación de la cobertura de la unidad de generación y esto es una consecuencia que indica que la operación de un mes no tiene ninguna dependencia con respecto a otro mes, conforme existe una dependencia intertemporal existen pequeños flujos asociados a una porción del riesgo de la cual no es posible realizar la cobertura completa.

Coeficiente vega mensual de pico

El coeficiente vega representa la sensibilidad del flujo de efectivo con respecto a la volatilidad implícita mensual y se representa como:

$$V_n^{mensual} = \frac{\partial V_0^n}{\partial \sigma_n^{mensual}} \quad (12)$$

Es importante resaltar que esta medida no se debe confundir con la sensibilidad de los parámetros del modelo llamado volatilidad, pues existe una diferencia conceptual entre la volatilidad implícita y la volatilidad paramétrica que significan cosas diferentes.

El coeficiente vega con respecto a la volatilidad implícita proporciona la posición de la opción de cobertura en el dinero, es posible expresar el coeficiente normalizado en porcentaje de la unidad de valor, este parámetro es afectado en mayor proporción por las unidades de pico donde el efecto en el cambio de la volatilidad es mayor.

Coberturas de precio con la producción de centrales generadoras

En la aplicación real de las técnicas de cobertura se busca lograr la estabilidad de los valores resultantes entre las políticas del despacho de generación y la cobertura de los riesgos seleccionados.

En la práctica, para determinar el despacho de generación en forma detallada para muchos generadores, presenta problemas de dimensionalidad y tiempo de cálculo que hace poco atractiva la utilización de la solución exacta del problema y, aun logrando ésta, las condiciones de operación en tiempo real hacen imposible mantenerse en las condiciones de la solución óptima del problema, esto se complica cuando se toman en cuenta los mercados paralelos de servicios auxiliares, en este caso se recurre a métodos heurísticos en el trabajo cotidiano.

Cuando se presenta una falla en los medios de generación o transmisión o una variación importante en el comportamiento aleatorio de la demanda, se provoca una variación en el precio esperado de electricidad, conforme el problema es mayor la variación del precio es mayor, si el estado operativo cuenta con poca reserva se presentan grandes picos de precio, por ejemplo, cuando sale de operación una unidad generadora de gran capacidad y bajo costo, la energía se debe suplir con medios de producción muy caros.

La experiencia en la operación de sistemas eléctricos a nivel mundial confirma que la distribución de probabilidad de la variación de precios presenta un sesgo importante y existe la posibilidad de grandes picos de precio, los resultados observados en la experiencia operativa produce efectos significativos en la estrategia de cobertura y complica el problema de optimización si se considera la dimensionalidad completa y la no linealidad de las variables de interés. La solución más aceptada es la simplificación del problema, a grado tal que permita obtener resultados razonables con la aplicación de técnicas heurísticas de solución del despacho, para obtener precios de electricidad necesarios en la determinación de contratos a futuro y el modelo de cobertura.

8. Administración de riesgos en portafolios del mercado de electricidad

La administración del riesgo por medio del uso de la flexibilidad es clave en el éxito de las empresas de suministro de energía. Se analiza la ingeniería financiera de los contratos que estarán totalmente cubiertos (*hedged*) contra movimientos adversos.

Se analiza el riesgo de volumen que no tiene una cobertura adecuada y es posible rescatarlo por medio de un despacho inteligente, Güssow (2001) compara el mercado de electricidad con el mercado accionario y encuentra que una característica particular del mercado de electricidad es que los precios presentan brinco y las empresas productoras normalmente están en una posición larga, razón que no permite utilizar la metodología tradicional de administración del riesgo del mercado accionario en el mercado de electricidad, el problema fundamental es que la electricidad no se puede almacenar y los fenómenos físicos de la transmisión presentan un mercado incompleto.

Un aporte importante de esta investigación es aplicar la idea de administración de riesgo al mercado de electricidad, la clave consiste en encontrar una liga entre los medios de producción y los contratos de suministro.

Un productor de electricidad está expuesto al riesgo del volumen al vender opciones tipo variación (a esta opción también se le llama variable en el factor de carga, en este acuerdo se compra una cantidad determinada de energía a un precio fijo que se debe consumir en un periodo determinado). Las opciones simples desarrolladas después de la regulación no permiten realizar la cobertura de volumen asociado a los contratos tipo *swing*.

El modelo de producción es una herramienta excelente para realizar la cobertura del riesgo de volumen y el riesgo del precio, al participar en el mercado *spot* y el principio de comportamiento de cobertura depende de la flexibilidad de las posibilidades de producción.

La utilización de contratos *forward* contrapone la posición de los precios *spot* por la imposibilidad de almacenamiento y presenta un punto de equilibrio entre el precio *spot* y el precio futuro. Los modelos desarrollados presentan que los portafolios de réplica sólo se ajustan con el precio de los precios de los futuros y las opciones sobre los futuros, pero no realizan la cobertura del riesgo de volumen que enfrenta el producto. En los modelos el punto de vista es estratégico y se optimiza el despacho por un periodo de un año y no se toma en cuenta la flexibilidad.

Unger (2002) presenta las bases para incorporar las medidas de riesgo a la flexibilidad operativa por medio de opciones reales.

El objetivo central de la cobertura en la administración del riesgo es alterar la exposición y reducir la volatilidad de los ingresos de la empresa. Tanto los activos como los compromisos de la empresa de energía están expuestos a la variación del precio de los productos, por lo que la cobertura se debe hacer al suscribir contratos a futuro, *swap*, contratos *swing*, precio promedio de opciones, cualquier tipo de derivado exótico.

El enfoque de la administración del riesgo de un productor de energía y la asignación de unidades, la idea es ver los activos de generación como parte del portafolio de la empresa y otra parte de los contratos que ha suscrito la empresa. Los modelos de los generadores de producción como primer paso es integrar el portafolio total de la empresa.

Análisis de los riesgos asociados a la inversión en generación eléctrica

Los riesgos asociados al mercado de electricidad que deben enfrentar las compañías productoras de electricidad se clasifican en:

- Riesgo de factores económicos que afectan la demanda de electricidad, la disponibilidad de mano de obra y de capital.
- Factores políticos del mercado: la regulación económica del mercado, el riesgo político que afecta los costos, las condiciones de financiamiento y el rendimiento del proyecto.
- Factores bajo el control de la compañía como la determinación del tamaño y la diversificación del programa de inversión, la selección de la mezcla de tecnologías, el control de costos de construcción y operación.
- Riesgo de precio en el mercado de electricidad.
- Riesgo de precio y disponibilidad de combustible.
- Riesgo de financiamiento de la inversión, este riesgo se mitiga con una adecuada estructura de capital de la empresa.

9. Conclusiones

La investigación realizada en el marco de referencia del suministro de energía eléctrica permitió evaluar portafolios de cobertura de riesgo de suministro y variación del precio de la electricidad, así como considerar condiciones cambiantes y el efecto de decisiones estratégicas para la aplicación de recursos económicos en la producción de electricidad en México.

La investigación realizada logra el objetivo propuesto al presentar los modelos que valúan portafolios de cobertura de riesgo precio y volumen o déficit de suministro eléctrico mediante opciones reales de electricidad y se presenta una propuesta de cobertura de precio de electricidad y de volumen de suministro fundamentadas en la conservación del nivel de confiabilidad de operación, al seleccionar el portafolio de recursos de generación.

Los derivados de electricidad presentan características particulares porque el balance entre la producción y la demanda es instantáneo y debe respetar las leyes físicas para la producción y el suministro.

El efecto de la falta de suministro, que es la condición de déficit, tiene un efecto social, político y económico que repercute en todos los niveles de la sociedad. Se debe destacar que la posibilidad de representar los contratos de suministro por estructuras elementales de derivados de electricidad permite evaluar cualquier contrato siempre que se identifiquen los factores de riesgo y su modelación es directa, al construir un portafolio con el conjunto de estructuras que satisfacen las condiciones del contrato.

En forma empírica, se observa que la estructura de portafolio ofrece una cobertura que se obtiene por el efecto de la diversificación, en caso del portafolio suministro se observa que la selección de la capacidad es un factor importante, además de la necesidad de mantener una relación adecuada entre las distintas fuentes de suministro.

Bibliografía

- Anders, George (1990), *Probability Concepts in Electricity Power Systems*, Ontario Hydro Research Division, John Wiley & Sons Inc, Toronto Canada.
- Black, F., Scholes, M. (1973), "The Pricing of Option and Corporate Liabilities", *Journal of political Economy*, **81**, pp. 637-654.
- Brealey, R., Myers, S., Allen, F., (2006), *Principios de Finanzas Corporativas*, 8a ed., McGraw-Hill/Interamericana, Madrid, España.
- Copeland, Tom, Antikarov, V., (2001), *Real Option: A practitioners guide*, Terexe, New York, USA.
- Cox, J., Ross, S., (1976), "The valuation of options for alternative stochastic process", *Journal of Financial Economics*, **7** num. 1, pp. 145-166.
- Cox, J., Ross, S., Rubinstein, M. (1979), "Option pricing: A simplified approach", *Journal of Financial Economics*, **7** núm. 3, pp. 229-263.
- Dixit, A. Pindyck R. (1994), *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, New York, USA.
- Fischer, S. (1978), "Call option pricing when the exercise price is uncertain, and the valuation of index bonds", *Journal of Finance*, **33**, núm. 1, pp. 169-176.
- Hull, John C. (2004), *Options, Futures & Other Derivatives*, 5a., Prentice Hall, New York, USA.
- IEA, OECD (2003), *Power generation invests in electricity markets*, OECD/IEA, Paris, Francia.
- Margrabe, W. (1978), "The Value of an Option to Exchange One Asset for Another", *Journal of Finance*, **33**, pp. 177-86.

Markowitz, Harry (1952), "Portfolio Selection", *Journal of Finance*, Mar. 1952, pp. 77-91.

Merton, R. C. (1976), "Option Pricing when Underline Stock Return are discontinuous", *Journal of Financial Economics*, núm. 3, pp. 125-144.

Rubinstein, Reuven, (1986), *Monte Carlo Optimization, Simulation and Sensitivity of Queuing Networks*, Krieger Publishing Company, Florida, USA.

Stiglitz, Joseph, (2000), *La economía del sector público*, 3a. ed., Antoni Bosch, Barcelona, España.