

ANÁLISIS DE OPCIONES REALES COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR EL IMPACTO DE LA REGULACIÓN EN LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

REAL OPTIONS ANALYSIS AS A TOOL TO ASSESS THE IMPACT OF REGULATION IN THE EXPANSION OF ELECTRICAL SYSTEMS

Rolando Pringles, Fernando Olsina, Francisco Garcés

*Instituto de Energía Eléctrica (IEE), Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina,
Telefax: +54 264 422 6444. rpringles@iee.unsj.edu.ar, olsina@iee.unsj.edu.ar, garces@iee.unsj.edu.ar*

RESUMEN: En los mercados eléctricos desregulados, el sistema de transmisión se convirtió en el principal medio que permite adecuadas condiciones de competencia en el sector de generación. Una expansión deficiente de las redes de transmisión impide los potenciales beneficios en términos de eficiencia asociados a los mecanismos de mercado. En consecuencia, es fundamental proporcionar políticas de inversión y señales económicas claras para atraer inversiones eficientes al sector de modo que el sistema de transmisión se desarrolle a mínimo costo, con niveles adecuados de calidad de servicio y confiabilidad, y adaptado a los requerimientos de generadores y consumidores.

El presente trabajo propone la implementación de una herramienta moderna de evaluación económica que brinda al Regulador la capacidad de valorar distintos incentivos que permitan a los inversores tomar decisiones eficientes en ambientes de gran incertidumbre. La herramienta de evaluación se denomina Análisis de Opciones Reales.

Esta técnica permite valorar en forma correcta las decisiones futuras que puede tomar un inversor como diferir, modificar o aplazar proyectos de inversión, en respuesta al arribo de nueva información o en la medida que las incertidumbres sean resueltas. Las decisiones se evalúan desde el punto de vista del agente inversor, el cual trata de maximizar sus ingresos en el periodo establecido para recuperar el capital invertido. Los resultados del trabajo permiten estudiar el comportamiento del agente inversor, respecto a la toma de decisión, cuando este tiene la posibilidad de administrar la opción de diferir, bajo distintos mecanismos regulatorios que incentiven la expansión del sistema de transmisión.

Palabras Clave: Red de transporte, planificación, regulación, Opciones Reales, incertidumbres, flexibilidad, simulación de Monte Carlo.

ABSTRACT: In deregulated electric markets, the transmission infrastructure is critical for keeping competition in the generation sector. A poor expansion of transmission networks would prevent the potential benefits of restructuring. Consequently, it is essential to provide regulatory policies and clear economic signals to attract efficient investments in transmission sector so that the transmission system is developed at minimum cost, with adequate levels of reliability and service quality, and adapted to the requirements of generators and consumers.

This paper proposes a modern economic valuation methodology for the regulatory body that provides the opportunity to assess different types of incentives that allow investors to make efficient decisions in highly uncertain environments. The assessment tool is called Real Options Analysis.

This methodology enables the proper assessment of future decisions that may be made by an investor in response to the arrival of new information and to the extent that uncertainties get resolved. Decisions are evaluated from the point of view of the investor agent, which tries to maximize revenue in the period established to recover the capital invested. The results of this paper will make it possible to study the behavior of an investor, regarding decision-making, when it has the ability to manage an option to defer, under different regulatory mechanisms that encourage the expansion of transmission system.

Key Words: Transmission system, planning, regulation, Real Options, uncertainty, flexibility, Monte Carlo simulation.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sector eléctrico a nivel mundial ha enfrentado grandes e importantes cambios estructurales y paradigmáticos, el objetivo central ha sido permitir mayor competencia en el sector de generación y libertad de elección de los consumidores con el fin de mejorar calidad del producto eléctrico. Un paso trascendental en esta visión de la industria eléctrica operando bajo mecanismos de mercado, ha sido la separación de los segmentos de generación, transmisión, distribución y comercialización en negocios autónomos. El sector de generación y comercialización se encuadraron en actividades puramente competitivas, no así el sector de transmisión y distribución, que principalmente por sus economías de escala, permanecieron como actividades monopólicas debidamente reguladas.

El sistema de transmisión tiene un rol vital en los mercados eléctricos competitivos, porque es el principal medio que permite la competencia en el sector de generación. Su función principal es brindar el libre acceso y sin discriminación a la red de transporte tanto a generadores como consumidores.

En la estructura de mercado, el regulador enfrenta la necesidad de proporcionar incentivos de eficiencia técnica y económica, de modo que el sistema de transmisión se desarrolle a mínimo costo, con niveles adecuados de calidad de servicio y confiabilidad, y adaptado a los requerimientos de generadores y consumidores [1]. En consecuencia, el organismo regulador necesita herramientas para poder evaluar adecuadamente las inversiones en el sistema de transmisión.

La literatura de evaluación de proyectos de inversión reconoce al Análisis de Opciones Reales (ROA) como una herramienta avanzada para valorar proyectos irreversibles en ambientes competitivos sujetos a importantes incertidumbres, y que poseen flexibilidad gerencial en la toma de decisiones en la medida que las incertidumbres se van develando [2-4]. Dado que los proyectos de inversión en el sector de transmisión de energía eléctrica presentan estas características, el potencial del análisis de opciones puede ser explotado completamente.

El presente trabajo propone la implementación de una herramienta moderna de evaluación económica basada en el Análisis de Opciones Reales que permite al organismo regulador analizar distintos mecanismos eficientes para incentivar proyectos de inversión en capacidad de transmisión. La herramienta permite al regulador analizar el comportamiento de las inversiones en función del costo y del tiempo de duración de la licencia de construcción el impacto que tiene sobre la ejecución de una inversión el reconocer una prima sobre la tasa de descuento o costo de capital de la inversión; el nivel adecuado de retornos regulados que incentive la inversión privada y el valor que se establezca para la energía no suministrada o VOLL (Value of Lost Load) que proporcione señales correctas para nuevas infraestructura en transmisión de energía eléctrica.

Los resultados del trabajo permiten estudiar el comportamiento del agente inversor, respecto a la toma de decisión, cuando tiene distintos tipos de incentivos por parte del organismo regulador para realizar la expansión del sistema de transmisión.

2. VALUACIÓN DE INVERSIONES FLEXIBLES BAJO INCERTIDUMBRES

Entre los métodos tradicionales de evaluación de inversiones, el más extensamente difundido es el valor presente neto de los flujos de fondos descontados (VAN). Además del problema de pronóstico y descuento de los flujos de fondos futuros, la principal desventaja del VAN consiste en que no puede tratar adecuadamente el tema de flexibilidad en la toma de decisiones.

La regla de decisión del VAN es emprender las inversiones con valores presentes netos positivos y rechazar aquellas con valores presentes netos negativos. Pero en esta inmediata aceptación/rechazo en la decisión, implícitamente el VAN ignora el valor de las opciones reales típicamente embebidas en las inversiones de capital, tales como la opción de posponer una inversión, la opción de ampliar o contraer una capacidad instalada, la opción de cerrar un negocio, o la opción para abandonar obteniendo un valor de salvataje. Cuando las condiciones de mercado son sumamente inciertas, proyectos que contengan opciones de flexibilidad pueden añadir un significativo valor y volverse atractivos. En un contexto de incertidumbres, está demostrado que el VAN subestima sustancialmente el valor de las inversiones de capital [3-5].

A diferencia del VAN, el enfoque de opciones reales puede tratar apropiadamente la flexibilidad para cambiar o revisar decisiones cuando la incertidumbre sobre algunas variables críticas es resuelta. Como se muestra [6], mientras el análisis de flujo de fondos descontado es aplicable sólo a proyectos cuyas rentabilidades poseen baja volatilidad, el ROA es aplicable a la mayor parte de proyectos debido a su eficacia para manejar la alta volatilidad que caracteriza los proyectos de la inversión en condiciones reales. La lista creciente de usos del ROA incluye industrias de investigación y desarrollo (ej.: farmacéuticas), inversiones tecnológicas, industrias de recursos naturales, proyectos de manufactura y stock (ver [6, 7] para más detalles y referencias bibliográficas).

Análisis de Opciones Reales

Las Opciones Reales representan una extensión conceptual de la teoría de opciones financieras [8] aplicadas sobre activos tangibles o reales. Una opción financiera da a su propietario el derecho, pero no la obligación, a comprar o vender un activo financiero a un precio determinado. Análogamente, una empresa que realiza inversiones estratégicas tiene el derecho, pero no la obligación, de aprovechar estas oportunidades para obtener beneficios en el futuro. Una oportunidad de inversión estratégica

se puede considerar como una fuente de flujos de efectivo más una serie de opciones o decisiones contingentes. El enfoque de opciones reales, al igual que el de opciones financieras, proporciona al titular del derecho una protección frente a las pérdidas mientras que no limita las ganancias.

El Análisis de Opciones Reales ayuda a los directivos a estudiar desde un nuevo enfoque las oportunidades que se presentan para planificar y gestionar inversiones estratégicas [9]. Las opciones reales pueden estar presentes en planes, proyectos o inversiones empresariales flexibles.

Estas opciones pueden ser abandonar o vender el proyecto de inversión antes de concluirlo, cambiar el uso, la tecnología o prolongar la vida útil del proyecto, seleccionar distintas capacidades de producción; inversión en investigación y desarrollo; múltiples opciones de crecimiento en una empresa, etc. Algunas opciones ocurren naturalmente, otras pueden ser deliberadamente planificadas o construidas a un costo determinado.

La presencia de opciones reales incrementa el valor de un proyecto de inversión. El valor del proyecto con flexibilidad se determina como el valor del proyecto sin las opciones, calculado de forma clásica, utilizando el VAN tradicional, más el valor de la flexibilidad proporcionado por las opciones presentes en el mismo.

$$VAN_{flexible} = VAN_{clásico} + \text{Valor de Opciones Reales}$$

El potencial de la metodología de Opciones Reales se ve reflejado en la valoración de proyectos de inversión en que se verifican las siguientes condiciones: la inversión es parcial o totalmente irreversible, existe incertidumbre respecto al futuro rendimiento de la inversión, la gerencia dispone de cierta flexibilidad respecto a la oportunidad de realizar efectivamente la inversión, y es posible adquirir nueva información sobre la evolución futura de una variable relevante, aunque esta información siempre es incompleta.

Evaluación de inversiones en capacidad de transmisión con Opciones Reales

En la última década, el Análisis de Opciones Reales ha tenido un importante desarrollo en el sector de los mercados eléctricos. A partir de la introducción de estructuras de mercados competitivos y el gran número de agentes participantes se incrementó la incertidumbre en las variables del mercado. El principal motivo en el aumento de las incertidumbres se debe a la toma de decisiones descentralizadas, estrategias competitivas e incertidumbres en de los marcos regulatorios.

En el sector de generación se han concentrado el mayor número de aplicaciones del ROA, principalmente orientado a la evaluación de inversiones con diferentes tecnologías de generación y diferentes tipos de combustibles. En el sector de transmisión la aplicación y desarrollo del ROA ha sido muy limitado, apuntando

a conceptos generales y con escasas aplicaciones concretas a problemas reales [10].

La valuación de opciones reales embebidas en el problema de inversiones en la expansión del sistema de transmisión posee características particulares que conducen a que no todos los métodos de valuación sean adecuados. Las características son opciones tipo Americana (pueden ser ejercidas en cualquier instante de tiempo durante su periodo de vida), las decisiones poseen naturaleza camino dependiente y los activos subyacentes poseen múltiples fuentes de incertidumbre.

Las inversiones con las características mencionadas no pueden ser valoradas de manera apropiada por los método de Black and Scholes [8] y arboles binomiales [11]. En consecuencia, las investigaciones y desarrollos se han orientado a los métodos numéricos simulativos con los cuales se pueden valorar opciones complejas con múltiples variables inciertas.

En el campo de las finanzas, recientemente se ha propuesto un método de simulación denominado Least Squares Monte Carlo (LSMC) [12] que permite valorar opciones tipo americanas. El método LSMC combina simulación de Monte Carlo y programación dinámica, además utiliza el método de regresión lineal de mínimos cuadrados para determinar el valor de la función de continuación de la ecuación de Bellman. El valor ajustado de esta regresión es un estimador insesgado y eficiente de la función de expectativa condicional y permite estimar la regla de ejercicio óptimo para la opción.

El método de valuación de opciones a través de LSMC tiene un gran potencial en la evaluación de inversiones en el sistema de transmisión de energía eléctrica. El método simulativo LSMC permite valorar opciones tipo americanas, incorpora el tratamiento directo de todo tipo de activos, el valor del activo subyacente no necesita tener una distribución de probabilidad log-normal, puede considerar numerosas fuentes de incertidumbres y con diferentes tipos de comportamientos estocásticos, no requiere varianza constante de los retornos del subyacente y no presenta el problema de dimensionalidad que caracteriza a los algoritmos de programación dinámica estocástica convencional.

Otra importante propiedad que tiene el método LSMC es que se pueden aplicar técnicas de computación distribuida que permite acelerar dramáticamente los tiempos de cálculo. Esta es una característica muy importante al momento de evaluar inversiones en el sistema de transmisión. Principalmente porque para obtener los ingresos anuales del transportista es necesario, para cada nivel de demanda y estado de operación del sistema, determinar los precios de la energía en cada uno de los nodos del sistema durante el periodo de tiempo que comprenda la evaluación económica. En efecto, sin la ayuda de la técnica de computación distribuida la evaluación de las inversiones en el sistema de transmisión sería impracticable con la tecnología actual de computación.

Evaluación de la opción real de diferir

La opción de diferir corresponde a una opción simple tipo americana, es decir, el titular del derecho puede ejercerlo en cualquier momento hasta la fecha de vencimiento, en la medida que las incertidumbres sean develadas.

El valor de una opción americana, que aún no ha sido ejercida, en un instante de tiempo t es:

$$F(t, X_t) = \max_{t \in \mathcal{I}_i(t, T)} \left\{ E_t^* \left[e^{-r(t-t)} P(t, X_t) \right] \right\}$$

donde $\mathcal{I}_i(t, T)$ es el conjunto de tiempos de ejercicio óptimo en el intervalo $[t, T]$, siendo T la fecha de vencimiento de la opción. $E_t^*[x]$ representa el valor esperado neutral al riesgo condicional sobre la información disponible en t , y $P(t, X_t)$ es la función de ingresos de la opción en el instante de tiempo t .

La función de ingresos de la opción de diferir en un instante de tiempo $t < T$ es:

$$P(t, X_t) = \max \left\{ (I_N - C_I) - (I_R - C_{I_0}); 0 \right\}$$

donde I_N es el valor presente de los ingresos obtenidos a partir de que el proyecto es ejecutado, en este caso a partir de t . I_R es el valor presente de los ingresos a los cuales se ha renunciado dado que el proyecto hubiese sido concretado en el instante $t = 0$. C_I representa el costo de la inversión en el instante de tiempo t y C_{I_0} es el valor presente del costo incurrido si se hubiese invertido en $t = 0$.

En la fecha de vencimiento, $t = T$, el valor de la opción de diferir es:

$$\begin{aligned} F(T, X_T) &= P(T, X_T) \\ F(T, X_T) &= \max \left\{ (I_N - C_I) - (I_R - C_{I_0}); 0 \right\} \\ F(T, X_T) &= \max \left\{ (I_N - I_R) - (C_I - C_{I_0}); 0 \right\} \end{aligned}$$

Haciendo un paralelo con el análisis de opciones financieras vemos que la opción de diferir presenta el comportamiento de una opción de compra (*call*):

$$F_{\text{Call}}(T, X_T) = \max \{ S - X; 0 \}$$

donde el flujo de efectivo esperado que genere el proyecto menos el valor del flujo de efectivo al cual se ha renunciado, $(I_N - I_R)$ representa el precio del activo subyacente, S , y la diferencia del costo de ejecución del proyecto entre el instante de tiempo T y 0 , $(C_I - C_{I_0})$ equivale al precio de ejercicio de la opción financiera, X .

3. INCENTIVOS REGULATORIOS EN LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El objetivo de la regulación de la transmisión es posibilitar una expansión eficiente y oportuna de la red de transporte, adaptada al sistema de potencia, cumpliendo las restricciones de confiabilidad especificadas. Un régimen regulatorio apropiado es muy importante pero es difícil su implementación dado la variedad de costos (monetarios y algunos no monetarios) y conflictos de objetivos entre agentes inversores, consumidores de distinto tipo y ambientalistas que hacen imposible el consenso sobre el plan óptimo.

Después de más de dos décadas de instaurados los mercados competitivos en el sector eléctrico aún existe un intenso debate sobre la forma más eficiente de atraer inversiones destinadas a la expansión de la red de transmisión. Dos enfoques han sobresalido como mecanismos de incentivos para el desarrollo de la expansión del sistema de transmisión. El primero un mecanismo completamente regulado donde la agencia regulatoria establece las reglas de expansión y remuneración del servicio de transmisión. El segundo, un mecanismo de incentivos creado por las fuerzas del mercado donde los agentes participan en las inversiones según señales del mercado.

Las diferentes experiencias internacionales muestran que los modelos basados en inversiones reguladas no generan los suficientes incentivos para la expansión del sistema de transmisión y los mecanismos de mercado no remunerar la totalidad de los costos de la transmisión [13].

Con el objetivo de salvar las limitaciones de estos métodos, es adecuado el desarrollo de métodos híbridos que combinen las características de los enfoques regulados y mercantiles e incentiven expansiones eficientes en el sistema de transmisión.

En esta dirección, un esquema de regulación híbrido podría ser pensado como un esquema de remuneración mercante en el cual el Regulador, a partir de una política activa, puede adicionar señales económicas que incentiven a la inversión en infraestructura de transmisión.

Para poder establecer los incentivos que alienten inversiones eficientes y oportunas, el Regulador debe ser capaz de evaluar adecuadamente los proyectos y sus riesgos, de manera de proporcionar las señales económicas correctas.

Incentivos regulatorios evaluados bajo el Análisis de Opciones Reales

A partir del Análisis de Opciones Reales se busca evaluar el comportamiento de los inversores en capacidad de transmisión cuando el organismo Regulador proporciona distintos tipos de incentivos. En el presente trabajo de investigación se evalúan los siguientes incentivos:

- Tiempo de vigencia y valor de la licencia de construcción. El regulador puede modificar el plazo de vigencia de la licencia de construcción de manera de atraer inversiones en capacidad de transmisión. Respecto al valor de la licencia, el ROA permite al Regulador determinar el valor adecuado de la licencia para incentivar a la inversión inmediata en capacidad de transmisión. En esta dirección puede resultar que el valor de la licencia sea negativo, en este caso el inversor podría recibir un ingreso monetario adicional por la expansión del sistema.
- Prima adicional sobre el costo de capital del proyecto de inversión bajo ciertas condiciones de ingreso al sistema. El objetivo es fomentar el ingreso temprano de inversiones estratégicas. Desde la perspectiva de los usuarios esto se justifica sobre la base de que la entrada oportuna de las inversiones genera más beneficios que la prima reconocida a los inversores, la cual debe ser cubierta mediante algún cargo fijo en la tarifa.
- Nivel de retornos asegurados. El Regulador puede fijar ingresos adicionales que percibirá el inversor por la expansión del sistema de transmisión. El incentivo fomenta al transportista a identificar las expansiones necesarias y bajo un escenario base someterlas al mercado.
- Valor de energía no suministrada (Value of Lost Load - VOLL). El regulador puede determinar el valor adecuado del VOLL mediante el cual se remunera una inversión mercante y que incentive la inversión inmediata en capacidad de transmisión.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE OPCIONES REALES

Para comprender el uso que el organismo Regulador puede dar a la herramienta de evaluación de Análisis de Opciones Reales se elabora un ejemplo sencillo de inversión en capacidad de transmisión. Se evalúan distintas acciones que el Regulador puede considerar para incentivar la expansión del sistema de transmisión y se analizan las señales económicas que recibe finalmente el inversor.

El proyecto de inversión consiste de una interconexión que vincula dos sistemas de potencia eléctricamente desacoplados. La línea de transmisión tiene una longitud de 350 km y un costo inicial de inversión de 89.4 millones de dólares. La Fig. 1 presenta el sistema eléctrico de potencia bajo análisis.

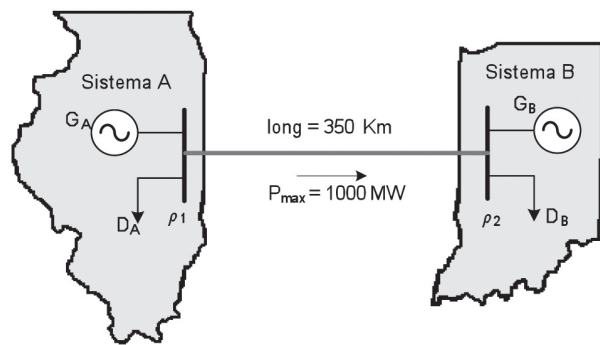


Fig. 1. Esquema eléctrico del caso ejemplo.

El proyecto será construido bajo el enfoque de expansión mercante. Bajo este enfoque, y como el proyecto de inversión es una línea radial que vincula dos sistemas autónomos, el inversor recibe derechos de transmisión de largo plazo (LTFTR) por una capacidad equivalente a la capacidad total de la línea de transmisión. Los LTFTR son concesionados al inversor por un periodo de 25 años.

Los ingresos o la remuneración de la interconexión surgen de la diferencia de los precios de energía que existe entre ambos sistemas multiplicado por la capacidad, en MW, de los LTFTR asignados al propietario de la línea de transmisión.

La demanda eléctrica se representa con una curva ordenada de carga de dos escalones. El parque de generación se considera puramente térmico.

La decisión sobre el proyecto de inversión está sujeta a la incertidumbre en el crecimiento de la demanda, los costos de generación y la disponibilidad de los componentes. La incertidumbre en el crecimiento de la demanda se modela con un Movimiento Browniano Geométrico con correlación en la tasa de crecimiento de ambos sistemas. La incertidumbre en los costos de generación se modela a partir de la incertidumbre en el costo de los combustibles de las unidades generadoras. La dinámica estocástica del precio de los combustibles se modela con un movimiento browniano con reversión a la media con saltos de Poisson. La incertidumbre del estado de operación de los componentes del sistema se considera a partir de un modelo de Markov de dos estados (operación-falla). Las Tablas 1, 2 y 3 presentan los datos para la simulación de la demanda y del parque de generación.

La evaluación de inversión considera que el proyecto puede ser diferido. Aplicando el Análisis de Opciones Reales se analiza el valor de la opción de diferir ante distintos mecanismos regulatorios.

El costo del capital para descontar los flujos de fondos y calcular el valor del VAN tradicional es del 12%. La tasa de descuento libre de riesgo para determinar el valor de la opción de diferir se considera 5%.

Tabla 1. Demanda Eléctrica.

Sist.	Demanda		Duración		Correlación	Tasa de Crecimiento [%]	Desvío [%]
	Pico [MW]	Valle [MW]	Pico [h]	Valle [h]			
A	900	750	2190	6570	0.65	2.00	2.00
B	1750	1350	2190	6570	0.65	3.00	2.50

Tabla 2. Parámetros de costos de generación.

Gen	Precio inicial [\$/MBTU]	Precio largo plazo [\$/MBTU]	Volat.	Coef. Rev.	Función de entrada-salida		
					a_0 [MBTU/h]	a_1 [MBTU /MWh]	a_2 [MBTU /MW ² h]
G _A	1.70	1.465	0.12	0.30	438.43	8.191	0.00644
G _B	2.115	1.750	0.12	0.30	285.40	8	0.00733

Tabla 3. Parámetros de confiabilidad de los componentes del sistema.

Componente	Capacidad	λ	μ	Probabilidad de Falla
	[MW]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	
Generador A	5000	0.000001	0.495	0.00000202
Generador B	5000	0.000001	0.190	0.00000111
Línea	1000	0.005	0.0495	0.0917

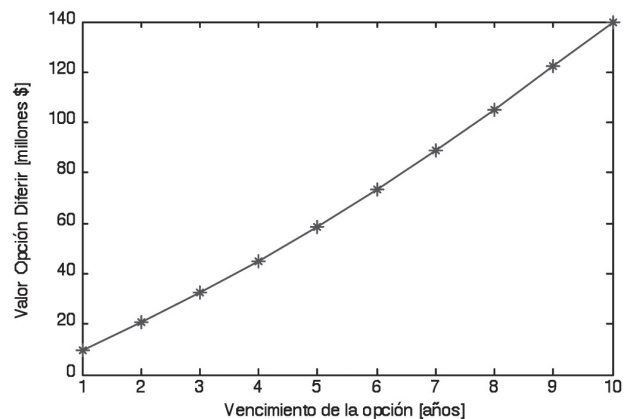
5. VALOR DE LA OPCIÓN DE DIFERIR LA INVERSIÓN EN FUNCIÓN DE ACCIONES REGULATORIAS

Vigencia y valor de la licencia de construcción

El valor actual neto (VAN) de la línea de interconexión de 500 kV es \$ -30.2M\$. Desde el punto de vista del inversor mercante si se considera solamente el valor del VAN para tomar la decisión sobre el proyecto de inversión, el proyecto tiene que ser descartado.

Al considerar la opción de diferir y esperar la evolución del mercado se observa que en la medida que se pospone el proyecto de inversión, la opción de diferir tiene más valor. En consecuencia el proyecto que considera la opción de diferir (proyecto flexible) tiene un mayor valor que el proyecto sin flexibilidad. Las Fig. 2 y 3 muestran respectivamente el valor de la opción de diferir y el valor del proyecto con la opción de diferir embebida, en función del plazo del vencimiento de la opción.

Vencida la opción de diferir el inversor pierde el derecho para construir la línea de transmisión. En este sentido, el periodo de vencimiento de la opción de diferir equivale al periodo de vigencia de la licencia de construcción de la línea de transmisión.

**Fig. 2.** Valor de la opción de diferir.

Si el regulador desea incentivar la inversión inmediata, o al menos que los inversores adquieran la licencia de construcción, debe fijar como mínimo un vencimiento de la opción de diferir igual o mayor a tres años. Periodo en el cual el valor del proyecto flexible toma valor positivo.

Por otro lado, el Regulador no debe fijar un periodo de vencimiento muy grande. Se observa que el valor de la opción de

diferir crece en la medida que crece el tiempo de vencimiento. En este sentido el inversor diferirá todo lo posible el proyecto de inversión retrasando su ingreso al sistema de potencia.

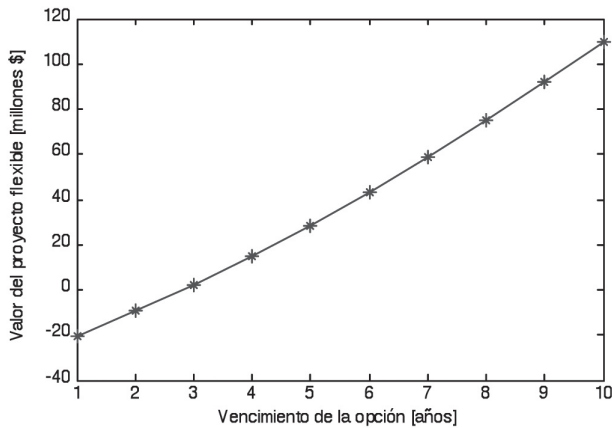


Fig. 3. Valor del proyecto con la opción de diferir.

Finalmente si el Regulador requiere un ingreso inmediato del vínculo de transmisión debe proporcionar un incentivo económico de manera que el VAN flexible del proyecto de inversión sea mayor o igual a cero. Este incentivo puede ser repartido entre los usuarios finales como un cargo fijo mediante algún esquema tarifario.

Respecto al valor de la licencia, el valor del VAN flexible que excede el umbral de decisión (valor cero) para cada periodo de vencimiento de la opción de diferir puede ser tomado como el valor de referencia máximo de la licencia de construcción con fecha equivalente a la opción de diferir.

La Fig. 4 presenta el valor de la licencia de construcción en función de la fecha de expiración. Además la figura representa el incentivo económico que el Regulador puede ofrecer a los inversores de forma de incentivar la inversión inmediata en el sistema de transmisión.

Prima adicional sobre el costo de capital del proyecto

Bajo ciertas condiciones el regulador puede ofrecer una prima adicional al inversor que compense el costo de capital para financiar el proyecto de inversión. La prima adicional se computa finalmente en la tarifa de los usuarios, pero esto se justifica sobre la base de que la entrada oportuna de las inversiones generará mayores beneficios a los usuarios finales.

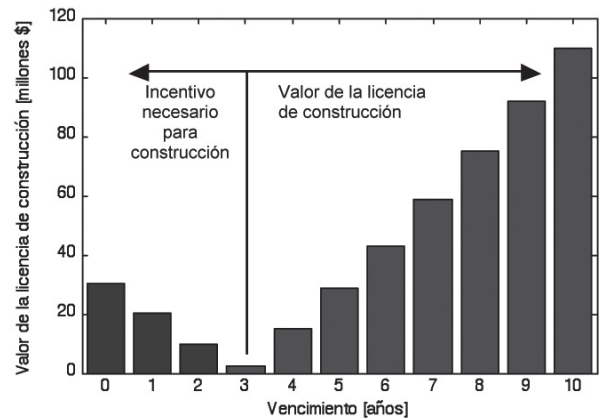


Fig. 4. Valor de la licencia de construcción.

Se plantea un caso en el cual se desea que la inversión ingrese en el próximo año, por tal motivo el vencimiento de la opción de diferir es 1 año, el costo de capital del proyecto de inversión es de 12%.

La Fig. 5 presenta el valor de la opción de diferir en función del valor de la prima. En la medida que el valor de la prima se incrementa, menor es el valor del costo de capital que debe hacer frente el inversor. En consecuencia el valor de la opción de diferir aumenta al aumentar el valor de la prima reconocida sobre el costo de capital de la inversión.

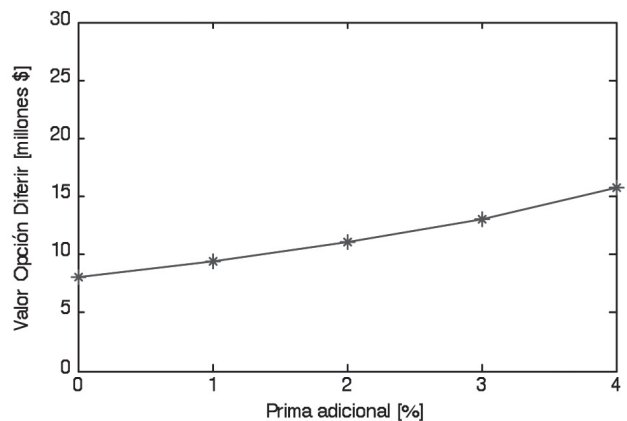


Fig. 5. Valor del proyecto flexible con la opción de diferir.

La Fig. 6 ilustra el valor del proyecto flexible con la opción de diferir. Se observa que el valor del proyecto aumenta con el incremento de la prima reconocida sobre el costo de capital. Bajo el enfoque de remuneración mercante con una prima adicional de 2 puntos (2%) sobre el costo de capital, el proyecto se vuelve económicamente atractivo y en consecuencia el proyecto de interconexión sería efectivamente realizado de manera inmediata.

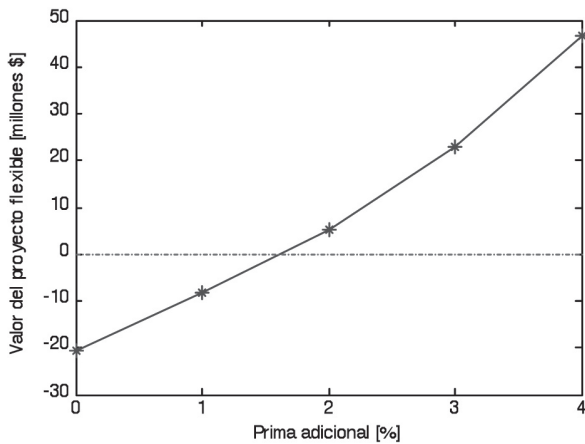


Fig. 6. Valor del proyecto flexible con la opción de diferir.

Nivel de retornos asegurados

El Regulador asegura al inversor un porcentaje del costo de inversión inicial que será abonado, por los usuarios finales mediante la tarifa eléctrica, como una renta fija por un plazo igual a la duración de los derechos de transmisión de largo plazo. Además, el Regulador puede ofrecer un mix entre una opción de diferir (vigencia de la licencia de construcción) y el porcentaje de retorno asegurado sobre la inversión.

Este mecanismo de incentivo busca que el VAN flexible del proyecto sea mayor que cero, de tal manera de atraer la inversión de capital.

El Análisis de Opciones Reales permite al Regulador evaluar el porcentaje del capital inicial que debe asegurar al inversor para que el proyecto sea económicamente atractivo considerando adicionalmente la opción de diferir la inversión, tal como se exhibe en la Fig. 7.

En este caso se observa que en la medida que aumenta el término de vencimiento de la opción, menor es el porcentaje del retorno sobre la inversión inicial que debe asegurar el Regulador.

Esto muestra que el costo que representa para la sociedad posponer el ingreso de un elemento al sistema se ve compensado con una disminución de la renta fija que tendría que abonar mientras dure la remuneración del proyecto de inversión.

En consecuencia, en una situación de déficit en el nodo importador, los ingresos del propietario de la transmisión están directamente relacionados con el valor de la energía no suministrada (VOLL).

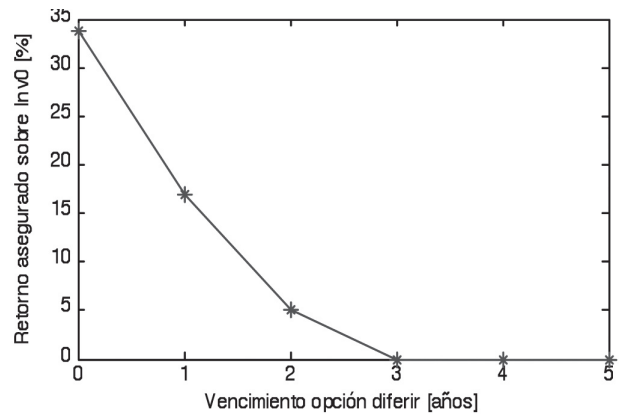


Fig. 7. Retorno asegurado sobre la inversión inicial que hace rentable el proyecto de inversión.

Si bien los escenarios de déficit son infrecuentes, generan ingresos extraordinarios a los inversores que permiten recuperar gran parte de los costos fijos de las inversiones.

El Análisis de Opciones Reales es una potente herramienta de evaluación económica que permite al Regulador analizar el comportamiento de las inversiones en transmisión cuando se modifica el valor de VOLL, tal como cuando se establecen precios topes (*price caps*).

Se evalúa una inversión en transmisión con la opción de diferir. La opción de diferir tiene un vencimiento de un año y se desea que en este periodo la inversión sea ejecutada. El Análisis de Opciones Reales permite determinar el porcentaje de retornos sobre la inversión inicial que son necesarios garantizar la ejecución de la inversión en función de distintos valores de VOLL que puede fijar el Regulador.

La Fig. 8 representa el comportamiento del valor del proyecto con la opción de diferir 1 año para distintos valores de porcentaje de retornos de asegurados sobre la inversión inicial cuando se fija el valor del VOLL en 1000 \$/MWh. Se observa que en la medida que aumenta el nivel de retornos asegurados aumenta el valor del proyecto flexible, llegando a un punto en que el proyecto comienza a ser económicamente factible.

La Fig. 9 describe el comportamiento del nivel de retorno que es necesario asegurar a los inversores para que la inversión sea ejecutada en función de distintos valores de VOLL. Se observa que en la medida que aumenta el valor del VOLL es menor el valor de retornos que el Regulador debe asegurar a los inversores para que estos lleven a cabo el proyecto de interconexión.

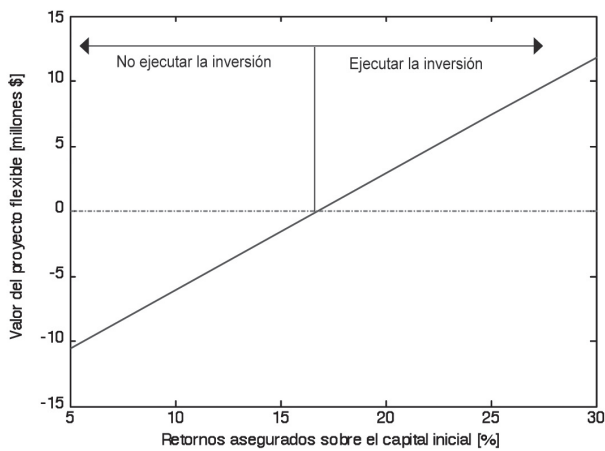


Fig. 8. Valor del proyecto flexible en función del retorno asegurado sobre el costo de inversión.

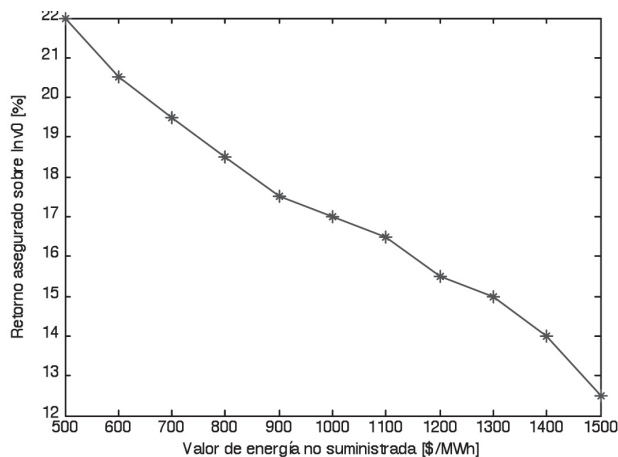


Fig. 9. Nivel de retorno asegurado sobre el costo de inversión y valor del VOLL para que la inversión sea económicamente factible.

6. CONCLUSIONES

La expansión eficiente del sistema de transmisión en los mercados eléctricos competitivos es un problema que no ha sido resuelto satisfactoriamente. Actualmente existen problemas de congestión, poder de mercado y bajos niveles de confiabilidad en los sistemas eléctricos de suministro.

El Análisis de Opciones Reales es una herramienta moderna de evaluación económica de inversiones que permite valorar adecuadamente proyectos de inversión flexibles en ambientes de gran incertidumbre.

La técnica de evaluación implementada se basa en un método de solución simulativo, denominado Least Squares Monte Carlo. Este método es capaz de valorar opciones complejas (tipo americana, *path-pendent*), y permite además considerar varias

fuentes de incertidumbres con diferentes tipos de comportamientos estocásticos.

El Análisis de Opciones Reales permite al organismo Regulador analizar distintos mecanismos para incentivar proyectos de inversión en capacidad de transmisión.

Se evaluó el comportamiento de las inversiones en función del costo y del tiempo de duración de la licencia de construcción; el impacto de reconocer una prima sobre costo de capital de la inversión; los niveles adecuados de retornos regulados que incentiven las inversiones privadas y el valor de la energía no suministrada que proporcione señales correctas para nuevas infraestructuras en transmisión de energía eléctrica.

Los resultados muestran que un proyecto que considera la opción de diferir, proyecto flexible, tiene un mayor valor que el proyecto sin flexibilidad.

El Regulador puede ajustar la fecha de vencimiento de la opción de diferir de manera de incentivar la adquisición de la licencia de construcción de la interconexión o limitar el tiempo que el proyecto puede ser retrasado.

El resultado del VAN flexible del proyecto le permite al Regulador determinar el nivel de incentivos económicos que requiere la inversión, de ser necesario, para que sea económicamente factible. Además, permite determinar el valor de referencia máximo de la licencia de construcción.

En el caso que el Regulador puede ofrecer una prima adicional, al inversor, que compense parte del costo de capital para financiar el proyecto de inversión, se observó que el valor de la opción de diferir se incrementa al aumentar el valor de la prima reconocida sobre el costo de capital de la inversión. En consecuencia el valor del proyecto flexible aumenta en la medida que aumenta la prima. En esta dirección, el Análisis de Opciones Reales permite determinar el nivel óptimo de prima sobre el costo de capital que el Regulador puede ofrecer al inversor para incentivar la inversión del sistema de transmisión.

Finalmente, el Análisis de Opciones Reales permite determinar el porcentaje del capital inicial y el valor de la energía no suministrada que debería asegurar el organismo Regulador a los inversores para que el proyecto de interconexión sea económicamente atractivo y ejecutado en los plazos esperados.

REFERENCIAS

- F. F. Wu, F. L. Zheng and F. S. Wen, "Transmission Investment and Expansion Planning in a Restructured Electricity Market," *Energy*, vol. 31, pp. 954-966, 2006.
- A. C. Dixit and R. S. Pindyck, *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, 1994.

- E. S. Schwartz and L. Trigeorgis 2004. *Real options and investment under uncertainty: classical readings and recent contributions*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, 2004.
- S. P. Feinstein and D. M. Lander, "A better understanding of why NPV undervalues managerial flexibility." *The Engineering Economist*, vol. 47, no. 4, pp. 418-435, 2002.
- A. Keswani, and M. B. Shackleton, "How real option disinvestment flexibility augments project NPV." *European Journal of Operational Research*, vol. 168, no. 1, pp. 240-252, 2006.
- L.T. Miller and C. S. Park, "Decision making under uncertainty-real options to the rescue?" *The Engineering Economist*, vol. 47, no. 2, pp. 105-150, 2002.
- L. Trigeorgis, *Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocation*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1996.
- F. Black and M. Scholes, "The pricing of options and corporate liabilities," *Journal of Political Economy*, vol. 81, no. 3, pp. 637-654, 1973.
- S. C Myers, "Finance Theory and Financial Strategy," *Interfaces*, vol. 14, no. 1 pp. 126-137, 1984.
- R. Pringles, F. Olsina y F. Garcés, "Opciones Reales en La Evaluación de Inversiones en Mercados Eléctricos Competitivos – Estado del Arte," XII ERIAC - CIGRÉ, Foz do Iguazú, Brasil, Mayo, 2007.
- J. Cox, S. Ross, and M. Rubinstein, "Option Pricing: A Simplified Approach," *Journal of Financial Economics*, vol. 7, pp. 229-264, 1979.
- F. A. Longstaff, and E. S. Schwartz, "Valuing American Options by Simulation: A Simple Least Squares Approach," *Review of Financial Studies*, vol. 14, no. 1, pp. 113-147, 2001.
- J. Rosellón, "Different Approaches Towards Electricity Transmission Expansion," *The Review of Network Economics*, vol. 2, no. 3, pp. 238-269, 2003.

BIOGRAFÍAS

Rolando Pringles obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en 2004 y el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en 2011 de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina. Actualmente es investigador en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ, Argentina. Sus áreas de interés son expansión del sistema de transmisión, evaluaciones de inversión bajo incertidumbre, aplicación de técnicas de inteligencia artificial en la decisión de inversiones irreversibles con incertidumbre y computación distribuida.

Fernando Olsina recibió el grado de Ing. Mecánico en 2000 y el grado de Doctor en Ingeniería en 2005 de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina. Investigador visitante en la RWTH Aachen y en la Universität Duisburg-Essen Alemania. Actualmente, es Investigador del CONICET en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ. Sus intereses se centran en métodos estocásticos y manejo de riesgo en mercados de electricidad.

Francisco Garcés. Francisco Garcés obtuvo el título de Ingeniero Electromecánico de la Universidad Nacional de Cuyo, Argentina en 1974 y el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Aachen University of Technology (RWTH), República Federal de Alemania, en 1982. Actualmente es investigador del CONICET en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE), Universidad Nacional de San Juan, Argentina, y Director del Reliability & Risk Management Group del IEE. Sus áreas de interés de investigación son confiabilidad de sistemas de potencia y cálculos de reserva.