



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

VALORACION DE INVERSIONES EN LA INTERCONEXIÓN DE INDUSTRIAS ELECTROINTENSIVAS BAJO INCERTIDUMBRES EXTERNAS Y COMPORTAMIENTO ESTRATÉGICO

Félix Fernández

Manuel García

Gerardo Blanco

Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos – GISE

Facultad Politécnica – Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

RESUMEN

Hoy en día, debido a la presencia de incertidumbres externas relevantes y el conflictivo interés entre agentes del mercado de energía, la práctica eficacia de los enfoques clásicos para valorar la inversión en transmisión está restringida. Este hecho se evidencia con frecuencia ya que los agentes de energía toman decisiones en virtud de la falta completa de información. El concepto clave de esta propuesta radica en la consideración de la toma de decisiones a una reacción estratégica para los diversos escenarios y a los movimientos tácticos del oponente.

En particular, el enfoque del trabajo presentado es la evaluación de la interconexión de una Industria Electrointensiva (IEI) al sistema de transmisión de la ANDE, así como la respuesta estratégica de la compañía eléctrica.

Basado en simulaciones computacionales de la operación del sistema eléctrico de alimentación, se hace el cálculo de la función de pago de la ANDE y la IEI. Posteriormente, los clásicos criterios robustos de decisión (Wald, Maximax, Hurwicz, Savage y Laplace) se utilizan para la determinación de una política de decisión individual bajo las incertidumbres externas. Finalmente, se estima el estado de equilibrio de Nash, por medio de un análisis -basado en los conceptos de teoría de juego- de la interacción entre los agentes estratégicos.

Al final del trabajo, se presenta un estudio del caso real, donde se evalúa la interconexión eléctrica de una gran empresa minera al sistema eléctrico paraguayo. En este caso, la decisión debe ser tomada en virtud de la incertidumbre de la oportuna puesta en marcha de un refuerzo fundamental del sistema de transmisión. Del mismo modo, el comportamiento de la ANDE, se analiza mediante el establecimiento de la tarifa eléctrica a la IEI y su impacto en la decisión final.

PALABRAS CLAVES

Incertidumbres externas, industria electrointensiva, Wald, Maximax, Hurwicz, Savage, Laplace, teoría de juego.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

1. Introducción

La transición energética de las industrias eno- intensivas hacia la utilización de energía eléctrica como fuente de abastecimiento, constituye un nuevo paradigma para la industria eléctrica. Por el contrario, las redes de transmisión normalmente presentan alguna debilidad y la mayoría no están preparadas para transmitir grandes bloques de energía que las IEI exigen. En dicho contexto, son necesarias inversiones intensivas para asegurar un suministro confiable y seguro. Como es sabido, el proceso de toma de decisiones de cuándo y dónde hay que añadir las interconexiones está basada en las expectativas previstas de las ubicaciones y el número de circuitos sobrecargados, los lugares y la puesta en marcha de nuevos proyectos eléctricos, así como la evolución de la demanda geográfica.

Por lo tanto, el proceso de inversión adquiere las características de un problema de decisión bajo incertidumbres. Es decir, nuevos modelos son necesarios para evaluar y cuantificar la incertidumbre en los escenarios con condiciones muy fluctuantes, como: cambios repentinos en los planes de expansión, la evolución de la demanda, así como retrasos de la puesta en marcha de proyectos de expansión.

En este sentido, la falta de información completa llevó casi naturalmente a la aplicación de los criterios tradicionales para la toma de decisiones bajo incertidumbres externas, tales como: Laplace, Wald, Maximax, Savage y Hurwicz.

Por otra parte, en el caso particular de la interconexión de una IEI, los que toman las decisiones son por lo general los dueños de la industria, que buscan racionalmente la minimización de sus gastos de capital y los costos de energía. Además, su decisión afecta directamente el desempeño de la compañía eléctrica.

Esta interacción entre dos jugadores también debe tenerse en cuenta en el proceso de toma de decisiones. En este contexto, este trabajo presenta un enfoque independiente para la evaluación de las inversiones en la interconexión de una IEI a la red en un entorno incierto.

Mediante la aplicación de conceptos de teoría de juego, se evalúa el problema de la toma de decisiones como un juego contra la naturaleza por medio de los criterios de decisión mencionados. En este tipo de juego, el que toma las decisiones sabe cuáles son los posibles estados de la naturaleza, pero no tiene ninguna información sobre cuál de ellos ocurrirá. La distribución de probabilidad asociada a los estados de la naturaleza es desconocida. Después, se lleva a cabo un juego no cooperativo entre los agentes, donde las variables de decisión son la inversión de interconexión para la IEI y la tarifa eléctrica para la ANDE. Es importante notar que la persecución de ambos jugadores es maximizar sus propios beneficios. En este sentido, este documento evalúa el equilibrio de Nash en esas condiciones.

El enfoque propuesto se aplica a un caso de estudio donde se evalúa la interconexión de una gran mina de titanio al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de la ANDE. Esta decisión se toma bajo dos grandes incertidumbres, la oportuna puesta en marcha de un importante corredor de transmisión en 500 kV desde la central eléctrica de Itaipú a la región más grande de consumo, y la expansión de las instalaciones de la IEI mediante la instalación de una planta fundidora de titanio.

2. Juegos contra la Naturaleza en las Inversiones de Transmisión: Criterios de Decisión

En los estudios de expansión en transmisión, las compañías eléctricas deben planificar refuerzos de la red, ya sea por motivos de reducir costos operacionales, aumentar la confiabilidad de la red o los niveles de seguridad [1]. Debido a las importantes economías de escala de las inversiones de expansión, las inversiones en transmisión (IT) deben satisfacer el crecimiento de la carga por la poca frecuencia de inversión en proyectos de gran tamaño con baja capacidad de adaptación [2]. Además, las IT's se consideran irreversibles una vez ejecutadas, es decir, son costos hundidos [3].



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Las inversiones de interconexión de IEI cumplen las características antes mencionadas. De hecho, las empresas que participan en el suministro de este tipo de industrias, pequeños cambios en los planes de expansión, pueden afectar al rendimiento de la interconexión prevista.

Este tipo de incertidumbre, las llamadas incertidumbres externas o no aleatorias, aparecen cuando no es posible estimar; con un nivel satisfactorio de confianza, el error en la previsión de datos. La incertidumbre presente en dicha información tiene una naturaleza no aleatoria. Cruciales escenarios inciertos que tendrían lugar en el futuro, tales como: la evolución en la expansión de la transmisión y el retraso de la puesta en marcha de los proyectos corresponden a este tipo de incertidumbres [4].

La gestión de esta incertidumbre en el problema de IT, se realiza mediante un modelo basado en reglas de decisión inspirado en los métodos de teoría de juego. En los juegos contra la naturaleza, la toma de decisiones y la naturaleza pueden verse como dos jugadores. Además, las alternativas y los estados de la naturaleza corresponden a las estrategias de dichos jugadores.

Muchos procesos de decisión pueden ser tratados por medio de tablas de decisión (tabla I). Sus elementos fundamentales son: el conjunto de estados de la naturaleza que pueden ocurrir en un tiempo futuro: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$; las estrategias de la que el tomador de decisiones debe seleccionar: s_1, s_2, \dots, s_m ; y el resultado $x_{n,m}$ que es el beneficio de la estrategia s_m en el marco del estado de la naturaleza θ_n .

TABLA I. TABLA DE DECISIÓN

	Estados de la Naturaleza						
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	...	θ_n
Estrategias	s_1	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$x_{3,1}$	$x_{4,1}$...	$x_{n,1}$
	s_2	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	$x_{3,2}$	$x_{4,2}$...	$x_{n,2}$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
	s_m	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	$x_{3,m}$	$x_{4,m}$...	$x_{n,m}$

En aras de la claridad, se asume un número finito de estrategias y estados de la naturaleza. La tabla o matriz de pagos, es una herramienta para responder la pregunta fundamental: ¿qué estrategia debe ser adoptada?, para llevar a cabo esto, un criterio de decisión debe ser asumido.

Los criterios de Wald, Maximax, Hurwicz, Savage y Laplace son los enfoques tradicionales para analizar este tipo de toma de decisiones bajo incertidumbre y los problemas de falta de información [4].

En principio, ninguno de estos criterios podría ser aplicado para seleccionar una alternativa de interconexión de inversión eficiente. La elección de cualquiera de ellos dependerá en gran medida del perfil de riesgo del tomador de decisiones [6].

2.1 Criterio de Wald

El peor resultado de una cierta estrategia s_j está dado por la siguiente expresión:

$$w_j = \min_{i \in \{1, n\}} x_{ij} \quad (1)$$

donde w_j representa el nivel de seguridad de la estrategia, es decir, el pago mínimo que el tomador de decisiones recibiría si elige tal estrategia s_j . El criterio de Wald [4] proporciona el máximo nivel de seguridad. Por lo tanto, los resultados de las políticas de decisión son:

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

$$w_k^* = \max_{j \in \{1, m\}} w_j = \max_{j \in \{1, m\}} \min_{i \in \{1, n\}} x_{ij} \quad (2)$$

Este criterio también es llamado criterio Maximin, y representa un enfoque pesimista.

2.2 Criterio Maximax

El criterio Maximax [8] establece que para una estrategia dada s_j , la mejor ganancia se define de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$o_j = \max_{i \in \{1, n\}} x_{ij} \quad (3)$$

donde o_j se define como el nivel de optimismo de la estrategia s_j , es decir, la recompensa máxima que el tomador de decisiones recibiría en virtud de la estrategia s_j .

Este criterio consiste en elegir la estrategia que proporcione el mayor nivel de optimismo. La política de la decisión en virtud de este enfoque se declaró de acuerdo con la siguiente regla:

$$o_k^* = \max_{j \in \{1, m\}} o_j = \max_{j \in \{1, m\}} \max_{i \in \{1, n\}} x_{ij} \quad (4)$$

Este enfoque corresponde a una perspectiva optimista.

2.3 Criterio de Hurwicz

Este enfoque es un intermedio entre los criterios de Wald y Maximax. Ya que pocas personas son extremadamente pesimistas u optimistas, el criterio de Hurwicz [9] considera que las estrategias se deben ordenar de acuerdo a un promedio ponderado de los niveles de seguridad y optimismo:

$$h_j = \alpha \cdot w_j + (1 - \alpha) \cdot o_j \quad (5)$$

Dónde h_j es el beneficio de Hurwicz de la estrategia s_j para un nivel dado pesimista α . Por lo tanto, la regla de decisión es la siguiente:

$$h_k^* = \max_{j \in \{1, m\}} (\alpha \cdot (\min_{i \in \{1, n\}} x_{ij}) + (1 - \alpha) \cdot (\max_{i \in \{1, n\}} x_{ij})) \quad (6)$$

Es importante destacar que el criterio de Hurwicz converge a los criterios de Wald y Maximax para los valores extremos de α (es decir, $\alpha = 0$ y $\alpha = 1$).

2.4 Criterio de Savage

Savage, en [10], sostiene que mediante el uso de los x_{ij} valores para la toma de decisión, el decisor compara el resultado de una estrategia con todos los otros resultados, independientemente del estado de la naturaleza en las que se producen.

Para este propósito, Savage define una pérdida relativa de oportunidades o de arrepentimiento r_{ij} - vinculado con una ganancia determinada x_{ij} - como la diferencia entre una ganancia determinada bajo un estado de la naturaleza específica y la mejor ganancia entre todas las estrategias disponibles bajo el mismo estado de la naturaleza.

$$r_{ij} = (\max_{q \in \{1, m\}} x_{iq}) - x_{ij} \quad (7)$$

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

En este contexto, si el estado de la naturaleza ha ocurrido y el tomador de decisiones ha optado por la estrategia s_i^* con la mayor ganancia, entonces la relativa pérdida o arrepentimiento es nula, pero si se ha elegido otra estrategia, como por ejemplo s_j , entonces la rentabilidad es x_{ij} y el valor de arrepentimiento es igual a $x_{iq}^* - x_{ij}$.

Bajo estas condiciones, el criterio propone que se elija la estrategia que minimiza el arrepentimiento del peor caso. Esta declaración puede ser formulada matemáticamente de la siguiente manera:

$$p_i^* = \min_{j \in [1, m]} \max_{i \in [1, n]} \left((\max_{q \in [1, m]} x_{iq}) - x_{ij} \right) \quad (8)$$

Este enfoque es también bien conocido como Minimax. Es importante destacar que, este criterio aplicado dentro de este método, es el arrepentimiento (pérdida relativa) en lugar de la propia rentabilidad, entonces no es tan pesimista como el criterio ordinario de Wald [11].

2.5 Criterio de Laplace

Este criterio se basa en el principio de la total falta de información. Entonces, se puede considerar que todos los estados tienen la misma probabilidad de ocurrencia. Así, para un problema de decisión con n posibles estados de la naturaleza, serían asignados a cada estado una probabilidad igual a $\frac{1}{n}$. Por lo tanto, el valor de pago de una determinada estrategia s_j sería:

$$E[L_j] = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot x_{ij} \quad (9)$$

Por último, la política de decisión es ejecutar la estrategia que presenta el valor más alto de beneficio esperado.

$$E^*[L_j] = \max_{j \in [1, m]} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot x_{ij} \quad (10)$$

3. Juegos No Cooperativos

En un juego no cooperativo, dos o más jugadores están involucrados en el proceso de negociación, en el que eligen una estrategia, tratando de obtener el mejor rendimiento posible. Como resultado, no se selecciona la estrategia que maximiza sus beneficios de forma individual en el conjunto de todas las estrategias posibles, optan por una estrategia que maximiza sus beneficios a sabiendas de que los otros jugadores están actuando de esa manera hasta que ningún jugador tiene un incentivo para tomar una decisión desfavorable que conduzca a menores ganancias. Por lo tanto, cada agente desempeña una estrategia para que sea la mejor respuesta sobre la estrategia del otro jugador y viceversa. Este arreglo de estrategias es llamado equilibrio de Nash y es, si existe (uno o más), el resultado de cada juego y define a los jugadores de mejor comportamiento estratégico [12].

Una industria como una IEI, sería necesariamente involucrada en una negociación con la compañía eléctrica en su región de influencia. El proceso de negociación puede ser asimilado como un juego no cooperativo en el que cada jugador (IEI y ANDE) se anticipa a la reacción óptima de los otros jugadores como la mejor respuesta para la toma de decisión. En otras palabras, ya sea la IEI o la ANDE puede esperar para tomar una decisión aislada, sin ser conscientes de la estrategia de la otra parte. En la siguiente sección, se propone un enfoque práctico para hacer frente a las inversiones en interconexión de IEI en condiciones de incertidumbre externa.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

4. Toma de Decisión Robusta bajo Incertidumbre Externa y Comportamiento Estratégico: Un Enfoque para la Valoración de las Inversiones en la Interconexión de IEI

Una adaptación progresiva de las instalaciones de transmisión no es una tarea fácil debido a las economías de escala, indivisibilidad e irreversibilidad. Debido a las características antes mencionadas, las IT's suelen tener un alto nivel de exposición a las incertidumbres [1].

En el caso de que un estado de la naturaleza desfavorable se desarrolle, la IT necesita la suficiente flexibilidad y robustez para adaptarse rápidamente a escenarios inverosímiles o resistir tales escenarios, sin cambios, aprovechando las oportunidades o las pérdidas por corte de acuerdo a como las incertidumbres se desarrollaron [13].

La evaluación de las inversiones en interconexión IEI se puede formular como un problema de gestión de riesgos, en el que las inversiones flexibles podrían actuar como una protección contra situaciones imprevistas. En condiciones desfavorables, la inversión flexible permitiría al planificador el ajuste de las estrategias [14].

Como se menciona en [4], el proceso de gestión de riesgo en este tipo de incertidumbre implica acciones alternativas, cuyos resultados dependen principalmente de los estados de la naturaleza.

La propuesta de toma de decisión básicamente implica la descomposición de un problema complejo de decisión en pequeñas tareas para resolverlo individualmente de una forma secuencial y lógica [4].

En este contexto, la metodología de la evaluación se divide en tres módulos: en primer lugar, un módulo de análisis técnico - económico, después, un módulo de toma de decisiones bajo incertidumbre externa y por último, un módulo de toma de decisiones estratégicas.

4.1 Módulo Técnico - económico

Vamos a considerar un mercado de energía donde una empresa eléctrica está a cargo del suministro de energía de una región geográfica determinada. Por lo tanto, la compra de energía de la empresa eléctrica del mercado mayorista es mediante contratos bilaterales y se los vende a los consumidores a un precio regulado. Además, también se asume que un gran consumidor es capaz de decidir libremente el punto de conexión a la red, así como el diseño técnico de esta interconexión. Al mismo tiempo, el consumidor lleva el gran costo del proyecto mencionado.

Entonces, por razones de simplicidad, se analiza el comportamiento y la consiguiente decisión de dos agentes de un sistema de transmisión determinado, es decir, la IEI y la ANDE. Cada agente tiene un objetivo diferente, por lo tanto, es necesario estimar dos funciones de pago, que tengan en cuenta sus necesidades y objetivos particulares.

Función de pago de la Compañía Eléctrica:

$$E[P_{\text{Verility}}] = \sum_{t=0}^H \frac{(R(t) - C(t) - E[\text{CENS}](t))}{(1+r)^t} \quad (21)$$

donde, en el período de tiempo t , $R(t)$ es el ingreso de la compañía eléctrica, $C(t)$ es el costo de la energía contratada por la compañía eléctrica, $E[\text{CENS}](t)$ es el costo de energía no suministrada esperado y se considera igual a 500 USD/MWh, H es el horizonte de análisis en años, y r es la tasa de descuento.

Función de pago de la IEI:

$$E[P_{IEI}] = \sum_{t=0}^N \frac{(-CI(t) - CE(t) - COA(t) - E[CENS](t))}{(1+r)^t} \quad (32)$$

donde, en el período de tiempo t , $CI(t)$ es el costo de inversión de la IEI (interconexión eléctrica de transmisión y otras instalaciones), $CE(t)$ es el costo de energía contratada por la IEI, $COA(t)$ es el costo de operación adicional relacionada con cada escenario y/o estrategia; finalmente, $E[CENS](t)$ es el costo de energía no suministrada esperado de la IEI.

Como fácilmente puede deducirse de las funciones de pago, primero es necesario simular el funcionamiento técnico de cada estrategia de interconexión bajo cada estado de la naturaleza. El rendimiento técnico de las estrategias de las interconexiones se evalúa mediante un análisis de estado estacionario basado en el flujo de potencia del software ETAP 7.5.1. Se estudia la desconexión de carga en cada escenario de acuerdo con el criterio N-1.

Asimismo, la cantidad de energía necesaria por la IEI y la ANDE se estiman con el objeto de calcular los gastos de energía esperados para el desarrollo de sus procesos operativos. Luego, el resultado final de este módulo es el beneficio de ambos jugadores para cada estrategia.

4.2 Módulo de Toma Decisiones Bajo Incertidumbre Externa

Como es lógico, cada jugador busca maximizar sus beneficios. Por lo tanto, tomando como punto de partida el resultado del último módulo, se compone una tabla de decisión para cada agente. En esta tabla, se debe incluir todas las estrategias posibles en el marco del conjunto de los estados de la naturaleza. Una de las hipótesis importantes es que estos estados son especificados por la naturaleza discreta de las incertidumbres no aleatorias.

Una vez planteadas estas premisas, se examina la robustez frente a la incertidumbre externa. La definición de robustez, es la cualidad de ser capaz de resistir los riesgos sin cambios, luego es posible tener una idea de las estrategias que son capaces de ofrecer la mejor solución posible que brinda una cobertura a los escenarios desfavorables. En consecuencia, el resultado final de este módulo será una política de inversión según los diferentes criterios robustos de decisión.

No obstante, la política de la posible decisión que se obtiene dentro de este módulo son evaluados en forma aislada. Es importante hacer notar en este punto que en el caso del propietario de la IEI, las estrategias disponibles es un conjunto conocido de proyectos de interconexión. Es decir, la variable de decisión para el tomador de decisión de la IEI es la forma en que la industria va a estar conectada al SIN. Por otra parte, la IEI puede decidir si se incluyen instalaciones adicionales en función de las condiciones del suministro eléctrico. Por otro lado, suponiendo que la ANDE tiene un plan de expansión conocido, que no puede ser modificado en un corto plazo, el proveedor sólo puede ajustar su arancel con el fin de mejorar su ganancia.

En este punto, cabe destacar que ambas variables de decisión están relacionadas. De hecho, el rendimiento de la ANDE podría cambiar bajo diferentes proyectos de interconexión de la IEI. Del mismo modo, el rendimiento de la IEI es dependiente del precio de la electricidad.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, una conjunta evaluación del problema de decisión se lleva a cabo en cuanto a la interacción entre la decisión de la IEI y la ANDE.

4.3 Módulo de Toma de Decisiones Estratégicas: Un Enfoque Leader-follower del Juego

Vamos a suponer que ambos jugadores tienen un conocimiento común acerca de las directrices que se requieren para calcular los valores de las ganancias, es decir, no se modela asimetría de información y el impacto en el comportamiento estratégico. El proceso de decisión sigue una secuencia de dos pasos: primero, la ANDE toma la decisión sobre la tarifa de la IEI, luego, la IEI decide el proyecto de interconexión así como las instalaciones adicionales de la planta.

El juego se resuelve mediante un proceso de optimización hacia atrás. Cada decisión s_U de la ANDE en el paso 1 conduce a un subjuego Φ_i en el paso 2 y un perfecto equilibrio de Nash se alcanza en cada subjuego $\Phi_i^*(s_U, s_E^*)$, la mejor reacción de la empresa eléctrica ocurre de s_E^* a s_U . Los beneficios en cuestión son los valores obtenidos en el último módulo.

$$\begin{aligned} \text{nivel 2: } \Phi_i^*(s_U, s_E^*) &= \max_{s_E^*} \{\Phi_i(s_U, s_{E1}), \dots, \Phi_i(s_U, s_{Ei}), \dots, \Phi_i(s_U, s_{Em})\} \\ s_E^* \in S_E &= \{s_{E1}, \dots, s_{Em}\} \wedge s_U \in S_U = \{s_{U1}, \dots, s_{Um}\} \end{aligned} \quad (13)$$

En consecuencia, la IEI toma la decisión óptima de anticipar mejor la reacción de la ANDE en el paso 2.

$$\text{nivel 1: } \Pi_i^*(s_U^*, s_E^*) = \max_{s_U^*} \{\Phi_i^*(s_{U1}, s_E^*), \dots, \Phi_i^*(s_{Ui}, s_E^*), \dots, \Phi_i^*(s_{Um}, s_E^*)\} \quad (14)$$

Surge un problema de múltiples períodos de optimización, cuando el juego se juega de forma recursiva (t_n, t_{n+1}, \dots). Por último, de un conjunto de estrategias, se encuentra uno para cada jugador, de tal manera que ningún jugador tiene incentivos para cambiar unilateralmente su estrategia, es decir, el equilibrio de Nash, donde un cambio unilateral de la estrategia por cualquiera de ellos, se traduciría en que el jugador gana menos con respecto a la estrategia original.

5. Caso de Estudio: Valoración de Inversiones en la Interconexión de una Minera Electrointensiva al Sistema de Transmisión del Paraguay

Como se ha publicado recientemente [15], “Paraguay, podría estar a punto de convertirse en el líder productor mundial de ilmenita, un mineral de titanio”.

Además, la disponibilidad final de energía barata de la central hidroeléctrica de Itaipú, podría alentar a los costos de operación del proceso del mineral de alto consumo de energía. Sin embargo, la debilidad del SIN es la principal barrera para la instalación de este tipo de negocios. A pesar de que muchos proyectos de expansión se llevó a cabo por su parte [16], lo que podría dar una solución temporal a varios problemas, el proyecto clave de expansión es una LT 500 kV de Itaipú a la región de mayor consumo del país. Este proyecto de mejora está planeando que entre en servicio en el año 2012, sin embargo, algunos retrasos en el cronograma del proyecto arroja una incertidumbre sobre su puesta en marcha.

En este contexto, se analiza las posibles alternativas para la interconexión de una planta minera de titanio al SIN. La primera etapa demandaría 100 MW, y después está prevista la puesta en marcha de una planta fundidora de titanio y el consumo aumentaría a 400 MW. La construcción de la fundidora depende de varios factores; incluyendo la tarifa que se aplicará a la IEI y la posibilidad de que el mineral extraído sea transportado a una planta de fundición existente en otro país para el procesamiento final. Estos hechos generan una gran incertidumbre sobre la construcción de la fundidora en el Paraguay.

Por lo tanto, esta sección se aplica en un modelo de 220/500 kV del SIN de la ANDE, que se ha construido con datos proporcionados por dicha empresa [16].

5.1 Estrategias y estados de la naturaleza del caso de estudio

5.1.1 Estrategia de la IEI (EIEI)

Se analizan cuatro alternativas sobre la base de dos conceptos fundamentales subyacentes: robustez y flexibilidad.

- *Estrategia 1:* Es considerada como una alternativa robusta de interconexión, implica un doble circuito de línea radial en 500 kV. Está expuesta sólo a una falla de Itaipú. Además, se considera la instalación efectiva de la planta fundidora, que tiene un período de construcción de tres a cinco años. Durante los primeros años de funcionamiento, el proceso final del mineral se realiza en Sudáfrica, donde la empresa minera tiene una planta de fundición en funcionamiento. Durante estos años, el costo de transporte, obtenido a partir de [17] se incluye en la función de pagos. Por otra parte, los costos de energía para el proceso de fundición se calculan sobre la base de las tarifas eléctricas de Sudáfrica de [18].

- *Estrategia 2:* Prioriza la flexibilidad. Por lo tanto, se supuso un proyecto de interconexión que comprende las inversiones en las diferentes etapas que se ejecutarán de acuerdo con el desarrollo de la incertidumbre. Por otro lado, constituye un refuerzo eficaz del SIN de la ANDE. Aquí también la instalación de la fundición es considerada como ejecutada.

- *Estrategias 3 y 4:* Básicamente, la alternativa 3 corresponde a la estrategia 1, pero aquí la inversión de la fundidora no se hace. Del mismo modo, la opción 4 replica la estrategia 2, sin necesidad de la instalación de la fundidora.

5.1.2 Estrategias de la empresa de electricidad (EEE)

- *Estrategia 1:* Es asumido el precio tope de la tarifa eléctrica aplicada a las IEI por la ANDE, su modulación en el periodo pico será del 100% y se establece una tarifa binomial donde la potencia contratada es de 29,28 USD/kW-mes, y la energía asegurada de 66,85 USD/MWh [18].

- *Estrategias 2, 3 y 4:* Estas estrategias consideran una reducción en la modulación de la hora pico del 90%, 80% y 70% respectivamente.

5.1.3 Estados de la Naturaleza

La construcción programada y la puesta en marcha de la LT 500 kV entre Itaipú y el área metropolitana es una de las principales incertidumbres. Esta línea se espera que esté en servicio a finales de 2012. Cabe destacar que ya han aparecido retrasos con respecto al cronograma del plan. Entonces, se ha considerado dos estados posibles de la naturaleza: primero, un estado natural es la puesta en marcha de la LT sin retraso, y un segundo escenario donde, la LT entra en servicio un año después de la fecha programada.

5.2 Resultado y discusión

Bajo las condiciones expuestas, el módulo técnico y económico calcula los beneficios de cada estrategia bajo cada estado de la naturaleza. Puede ser reconocido que la estrategia robusta ofrece la ventaja de operar en paralelo al SIN y un retraso en la puesta en marcha de la LT 500 kV no tiene ninguna influencia importante en el suministro de la planta. Su inconveniente es la exigencia de una gran inversión inicial, y si la construcción de la fundidora se rechaza, habría excesos de inversión que podrían haberse evitado. Por otro lado, la estrategia flexible tiene el atributo positivo de adaptabilidad a escenarios imprevistos. No obstante, el principal defecto es su mayor vulnerabilidad ante contingencias.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Por lo tanto, se lleva a cabo la toma de decisión robusta bajo incertidumbres externas. Con el fin de determinar la estrategia de interconexión que da como resultado más favorable a la IEI, así como a la ANDE, las estrategias de la IEI (EIEI) son evaluadas por los criterios de decisión de ambos jugadores, considerando que la ANDE establece la tarifa en el valor tope del precio.

Como puede verse en la tabla II, la mejor estrategia de la IEI es interconectar la planta al SIN de acuerdo con la EIEI 4, es decir, la fundidora no se instala en el Paraguay. Por otro lado, desde el punto de vista de la ANDE, el mejor escenario bajo el límite de precio ajustado es la ejecución de la EIEI 2 por la empresa minera. En este caso, las decisiones óptimas son coincidentes.

TABLA II. TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRES EXTERNAS

Jugadores	Criterios				
	Wald	Maximax	Hurwicz	Savage	Laplace
Compañía Minera	EIEI 4	EIEI 4	EIEI 4	EIEI 4	EIEI 4
ANDE	EIEI 2	EIEI 2	EIEI 2	EIEI 2	EIEI 2

Cabe destacar que las estrategias de ambos jugadores son óptimas y desiguales. Por lo tanto, con el fin de analizar las interacciones de decisión entre la IEI y la ANDE, se lleva a cabo el tercer módulo. La tabla III describe los resultados basados en el Criterio Maximax.

TABLA III. ANÁLISIS DE ESTRATEGIA DE INTERACCIÓN BASADO EN TEORÍA DE JUEGO

		ANDE							
		EEE 1		EEE 2		EEE 3		EEE 4	
		CoMin	ANDE	CoMin	ANDE	CoMin	ANDE	CoMin	ANDE
Compañía Minera (CoMin)	EIEI1	-2,396.9	562.3	-2,311.8	477.2	-2,226.8	392.1	-2,102.4	307.1
	EIEI2	-2,393.1	562.5	-2,307.9	477.4	-2,222.9	392.3	-2,098.5	307.2
	EIEI3	-2,354.5	253.1	-2,316.7	215.3	-2,278.8	177.4	-2,173.7	139.6
	EIEI4	-2,318.5	252.7	-2,280.7	214.9	-2,242.9	177.1	-2,137.7	139.2

En la aplicación de teoría de juego al Criterio Maximax, el punto de equilibrio de Nash es la reducción de la tarifa en un 20% del precio tope y la ejecución de EIEI 2 (interconexión flexible con instalación de fundidora). Es notable el hecho de que si se aplica el precio más alto posible (por EEE 1), la planta minera transportaría y procesaría la ilmenita en Sudáfrica. Bajo esta condición, el ingreso del suministrador de energía se reduciría significativamente. Sin embargo, una reducción del 20% de la tarifa sería para incentivar la instalación de la fundidora en el Paraguay y además aumentaría los ingresos de la ANDE, disminuyendo al mismo tiempo, los costos de la IEI.

6. Conclusión

Se ha presentado la aplicación de un nuevo método para la evaluación de la interconexión de IEI bajo incertidumbres externas. La atención se centra en la toma de decisiones en base al comportamiento estratégico de los agentes externos del mercado de energía mediante la aplicación de conceptos de teoría de juego. Se ha revelado que una evaluación individual por medio de los criterios clásicos de decisión puede ser inadecuada para la toma de decisiones eficaz y coherente, ya que la interacción de las estrategias de los agentes produce un impacto significativo sobre los resultados de la toma de decisiones.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

En un caso de estudio real, se ha demostrado que, el equilibrio resultante de Nash podría sugerir estrategias contrarias a la intuición que puede conducir a escenarios gana-gana. Además, se ha ilustrado cómo la óptima decisión puede inducir a un error bajo los criterios tradicionales de decisión individual.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Latorre, R. Cruz, J. Areiza, and A. Villegas, "Classification of publications and models on transmission expansion planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, 18, 2003, pp. 938-946.
- [2] S. Stoft, "Transmission Investment in a Deregulated Power Market," *Competitive Electricity Markets and Sustainability*, Edward Elgar Publishing Limited, chap. 4, pp. 87-130, 2005.
- [3] G. Blanco, F. Olsina, O. Ojeda, and F. Garcés, "Transmission expansion planning under uncertainty - The role of FACTS in providing strategic flexibility," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania: 2009, pp. 1-8.
- [4] P. Vasquez, Z. A. Styczynski, and A. Vargas, "Flexible decision making-based framework for coping with risks existing in transmission expansion plans", in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, Bogotá, Colombia, 2008, pp. 1-9.
- [5] J. Barros, L. Moulin and A. Melo, "Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão sob condições de incertezas externas através de jogos contra a natureza" in XIV ERIAC Proceedings, Ciudad del Este, 2011, pp. 1-10.
- [6] J. Barros, L. Moulin and A. Melo, "Embutindo Critérios de Jogos contra a Natureza e Análise Hierárquica de Processos nas Decisões de Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão sob Incertezas Externas" in XIV ERIAC Proceedings, Ciudad del Este, 2011, pp. 1-10.
- [7] A. Wald, *Statistical decision function*, Wiley Ed., New York, 1950.
- [8] J. Milnor, *Games Against Nature*. In Thrall, R. M.; Coombs, C.; and Davis, R., eds., *Decision Processes*. John Wiley & Sons. 1954
- [9] L. Hurwicz, "A class of criteria for decision-making under ignorance", Cowles Commission, 1951.
- [10] L. Savage, "The theory of statistical decision", *Journal of the American Statistical Association*, 1951, vol. 46. pp. 55-67.
- [11] G. Loomes, and R. Sugden, 'Regret theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty', *Economic Journal*, vol. 92(4), 1982, pp. 805-24.
- [12] P. K. Dutta, *Strategies and Games: Theory and Practice*, 2. MIT Press, 1999.
- [13] G. Blanco, F. Olsina, F. Garcés, and C. Rehtanz, "Real Option Valuation of FACTS Investments Based on the Least Square Monte Carlo Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, 2011, pp. 1389-1398.
- [14] S. Blumsack, "Network Topologies and Transmission Investment under Electric-Industry Restructuring," Ph.D. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburg, 2006.
- [15] "Paraguay industry: New mining frontier", The Economist Intelligence Unit, Dic-2010. [Online]. Available: <http://tinyurl.com/2557ccw>
- [16] Administración Nacional de Electricidad, "Plan Maestro de Generación, Transmisión y Distribución ANDE", Periodo 2009-2018", 2011.
- [17] Cámara N. de C. y S. del P. (CNCSP), Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), "Impacto del Transporte y de la Logística en el Comercio Internacional del Paraguay". 2006. Available: <http://tinyurl.com/6n5jrn5>
- [18] CVGK Murty, R. Upadhyay, S. Asokan, "Electro Smelting of Ilmenite for Production of TiO₂ Slag-Potential of India a Global Player", in *INFACON XI*, New Delhi, India, 2007, pp. 823-836.
- [19] Decreto Nro. 7406, "Por el cual se aprueban las Tarifas del Suministro de Energía Eléctrica a ser aplicada por la Administración Nacional De Electricidad". Oct. 2011.