

MANEJO DE RIESGO EN PLANES DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN INCORPORANDO FLEXIBILIDAD A TRAVÉS DE INVERSIONES EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Paúl Vásquez

Alberto Vargas
IEE - UNSJ: Argentina

RESUMEN

Debido a diversos cambios que en las últimas décadas han tomado lugar en los Mercados Eléctricos (ME), las incertidumbres se han profundizado a tal punto que los métodos usualmente empleados para resolver la tarea de la Planificación de Expansión del Sistema de Transmisión (PET), carecen de eficacia y resultados prácticos. Un camino sólido y prometedor para enfrentar adecuadamente las incertidumbres del problema es invertir en planes de expansión flexibles, los cuales permitan al planificador responder con decisiones contingentes ante la ocurrencia de escenarios adversos.

La disponibilidad de nuevas alternativas de decisión, permite a los planificadores disponer de recursos adicionales para conducir la expansión con mayor adaptabilidad y menores riesgos. Sobre la base de un análisis de las principales incertidumbres de la PET, así como también, de las posibilidades existentes para su manejo, se propone un conjunto de pautas metodológicas con las que se puede enfrentar satisfactoriamente el problema desde el punto de vista práctico. Los conceptos del método de Valoración de Opciones Reales, el cual tradicionalmente es empleado como herramienta de decisión de inversiones bajo incertidumbre, son extendidos al problema de la PET para la determinación de estrategias de expansión capaces de adaptarse a la dinámica actual de los ME.

PALABRAS CLAVE: Planificación de Transmisión, Incertidumbre, Flexibilidad, Adaptabilidad, Irreversibilidad, Riesgo, Generación Distribuida, Opciones Reales.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de transmisión cumple un papel fundamental dentro de los mercados eléctricos al ser el medio por el cual la competencia entre generadores se hace efectiva. Por tal motivo, éste debe desarrollarse de una manera óptima - adaptada, acorde con los requerimientos futuros de la demanda, la evolución de la generación sujeta a la inversión privada, como así también con la regulación.

En los últimos años, aspectos como: el cambio de paradigma en la organización estructural del sector eléctrico, el desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía eléctrica de menor escala (Generación Distribuida), los avances de la electrónica de potencia, la falta de inversión privada en el segmento de la transmisión, la dificultad de conseguir autorizaciones para nuevas trazas, la volatilidad en los precios de mercado de la energía eléctrica, la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) con menores márgenes de confiabilidad y principalmente la presencia de significativas incertidumbres en las decisiones de mediano y largo plazo, han modificado y complicado aún más la tarea de los planificadores de conducir satisfactoriamente la expansión de la transmisión. Para enfrentar el problema de la Planificación de la Expansión de los Sistemas de Transmisión (PET), han sido elaborados diversos modelos [1], [2].

No obstante, en la práctica se producen con frecuencia significativas desadaptaciones entre la capacidad de generación y transporte, y el crecimiento de la demanda. Por ello, los planes de expansión de transmisión propuestos, al requerir continuos ajustes y/o inversiones adicionales, realizados con el objeto de mitigar las consecuencias económicas negativas de tales desadaptaciones, usualmente son ineficientes [3].

Un ejemplo palpable de expansión ineficiente se encuentra en los SEP de Perú, Chile, Argentina y Ecuador, donde la capacidad de los sistemas de transmisión de cada uno de estos países no se ha desarrollado acorde con los requerimientos de sus mercados eléctricos. En Argentina y Chile los gobiernos han adoptado cambios en sus regulaciones, incrementando así su grado de intervención en la expansión de los sistemas de transmisión [4], [5].

Lo anteriormente expuesto revela la necesidad de proponer nuevos modelos de expansión de transmisión capaces de incorporar aspectos fundamentales que han emergido y forman parte del contexto actual de la planificación y que además no han sido contemplados por los modelos tradicionales.

2. FORMULACIÓN TRADICIONAL DE LA PET

Tradicionalmente el problema de la PET consiste en determinar un conjunto de proyectos de transmisión los cuales maximicen el beneficio social esperado del mercado eléctrico durante un horizonte de planeamiento dado, alcanzando además adecuados niveles de confiabilidad. Dicho horizonte de tiempo generalmente se encuentra dividido en dos escalas, una mayor que corresponde a los períodos (generalmente anuales) donde se modelan las decisiones de inversión en proyectos de expansión, y una menor, que corresponde a subperíodos cuya resolución estacional o mensual permite modelar los distintos estados típicos de operación del SEP.

La formulación matemática de la PET corresponde a un problema de optimización el cual considera elementos como: horizonte de planificación, el cual debe ser elegido de manera tal, que brinde a las diversas alternativas de expansión la posibilidad de competir en igualdad de condiciones (10 a 15 años) [6], variables de decisión caracterizadas por las distintas alternativas consideradas por el planificador para conducir la expansión y que además definen si el enfoque es estático o dinámico [1], [21], función objetivo que evalúa los diversos criterios de evaluación de desempeño de la expansión que generalmente son traducidos a costos incurridos durante la expansión, restricciones de igualdad y desigualdad utilizados para modelar las características del SEP, y un conjunto de variables de entrada, inciertas en su mayoría, requeridas para pronosticar los distintos estados operativos del SEP durante el horizonte de tiempo.

3. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES DE LA PET

En este trabajo se considera que uno de los aspectos más importantes que deben tomarse en cuenta en los nuevos modelos de la PET, es que la mayor parte de la información utilizada por el planificador es incierta. Por tanto, para una adecuada modelación matemática del problema es imprescindible distinguir los tipos de incertidumbres presentes en cada variable [6], [8]. *Incetidumbres aleatorias* son aquellas que se encuentran en variables cuya evolución obedece razonablemente a un comportamiento estadístico y por lo tanto pueden modelarse mediante funciones de distribución de probabilidad. *Incetidumbres no-aleatorias* son aquellas presentes en variables cuya evolución difícilmente se puede predecir de una manera estadística.

Su valoración se deriva de la percepción, sensación, experiencia y razonamiento. Este tipo de incertidumbres

pueden modelarse ya sea mediante funciones de distribución de probabilidad donde las probabilidades asignadas tienen cierto grado de subjetividad, o desde el punto de vista posibilista mediante la asignación de funciones de pertenencia haciendo uso de la teoría de conjuntos difusos. A continuación se analizan las principales incertidumbres de la PET.

3.1. Evolución Espacial de la Demanda Eléctrica

La incertidumbre a considerar se encuentra en la tasa de crecimiento de la demanda en cada subperíodo de análisis en cada nodo del sistema de transmisión. Esta tarea no es sencilla ya que el crecimiento de la demanda obedece a la interacción de un sinnúmero de factores, no obstante en la práctica se observa que su evolución obedece razonablemente a un comportamiento estadístico, de ahí que su incertidumbre pueda ser considerada como aleatoria.

3.2. Precio de los Combustibles

Cerca del 90% de la energía eléctrica comercializada a nivel mundial se produce a partir de combustibles fósiles. Los costos operativos de las centrales de generación dependen mayormente del precio del combustible. Dado que una mínima desviación en el pronóstico de los precios de los combustibles fósiles altera significativamente la función objetivo y en definitiva las decisiones de expansión, esta incertidumbre es considerada como relevante. La gran volatilidad presente en el mercado de los combustibles hace que un pronóstico en base a valores esperados sea poco adecuado, sin embargo puede ser razonablemente pronosticada en base a su comportamiento estadístico, de ahí que se considera que la incertidumbre de esta variable es aleatoria [10].

3.3. Tasa de Descuento Anual

El uso de una tasa de descuento es el mecanismo para trasladar al presente un flujo de fondos futuros y consiste básicamente en exigir a los dividendos futuros al menos la misma rentabilidad que ofrece una inversión alternativa de similar riesgo. Esta variable incierta normalmente no presenta gran volatilidad respecto de otras incertidumbres y en ocasiones está fijada por la regulación, por ello se considera que podría modelarse de una manera determinista.

3.4. Escenarios de Suministro de los Mercados Eléctricos

Con el advenimiento de la desregulación los riesgos de origen financiero se han incrementado significativamente [9].

Ingreso Futuro de Nueva Generación Centralizada

En la actualidad, la decisión de ingreso de un inversionista al mercado eléctrico depende principalmente de su eficiencia competitiva con respecto al resto de participantes, y de la precisión - riesgo con que sus pronósticos de rentabilidad, relativos a la evolución del mercado durante la vida de su proyecto, se ajusten a la realidad futura.

En consecuencia, dentro de la PET existen importantes incertidumbres con respecto al momento de ingreso de los nuevos proyectos de generación ya que un error en el pronóstico de esta variable, que afecta considerablemente al desempeño del SEP, podría conducir a decisiones de expansión erróneas. Dado que su pronóstico tiene relación con las decisiones de inversión de empresas privadas, es decir con la percepción y razonamiento humano, esta incertidumbre es considerada no-aleatoria.

Escenarios Futuros de Operación del Parque de Generación

Los parques de generación generalmente están constituidos por centrales de diversa tecnología, capacidad, y eficiencia. Dentro de la PET, esto implica que para modelar la operación del SEP (despacho centralizado) es necesario considerar el comportamiento aleatorio de los recursos hídricos y el comportamiento operación falla del parque de generación hidrotérmico como forma de determinar una energía esperada y una potencia firme. Dado que el comportamiento de estas variables obedece a un comportamiento estadístico, la incertidumbre a modelar se considerará en forma aleatoria.

Integración de Mercados

La tendencia a la formación de comunidades de naciones, incentiva la construcción de interconexiones internacionales entre SEP y con ello se vienen integrando varios mercados eléctricos. Desde la perspectiva de la PET, variables como: la entrada en operación de una interconexión y los precios pronosticados para ambos mercados referentes a la adquisición y venta de energía a lo largo del horizonte de planificación, afectan significativamente los costos totales esperados de expansión y consecuentemente las decisiones de expansión. Por este motivo, esta variable se considera relevante dentro del problema de la PET. Por un lado, la entrada en operación de una interconexión internacional no puede pronosticarse en base a estadísticas de ahí que sea considerada como una incertidumbre no-aleatoria. Por otro lado, el pronóstico de los precios y de la energía

intercambiada si bien obedece razonablemente a un comportamiento estadístico en el corto y mediano plazo, en esta investigación, cuyo enfoque es de largo plazo, se asume como una incertidumbre no-aleatoria por depender de los escenarios futuros de generación los cuales son no-aleatorios.

3.5. Costos de Inversión de los Proyectos de Transmisión

La incertidumbre presente en la evolución de los precios de la materia prima de los equipamientos de transmisión como son: el acero, el aluminio, el cobre y el aislamiento, incrementan las incertidumbres presentes en el pronóstico de los costos de inversión de dichos proyectos. Los precios de estas materias primas tienen una considerable incidencia en los costos de inversión de los proyectos de transmisión y por tanto afectan las decisiones de expansión. Por tal motivo, esta variable se considera como relevante dentro de la PET. La significativa volatilidad presente en los mercados de las materias primas, así como los considerables tiempos de ejecución de los proyectos, podrían llevar a decisiones erróneas en caso de modelar esta variable de una manera determinista, de ahí que se deba considerar el carácter aleatorio de estas incertidumbres.

3.6. Inversiones y Operación de la GD

La GD se define como una fuente de energía eléctrica distribuida en los SEP ubicada muy cerca de los centros de consumo. Cabe destacar que la GD si bien tiene notable menor eficiencia por kWh producido que los sistemas de generación centralizada, estas diferencias pueden ser ampliamente compensadas por su cercanía a los centros de consumo y bajo ciertas circunstancias favorables que se producen cuando se evitan pagos de transporte, se protege a la demanda contra altos precios de mercado, se logran *diferir grandes inversiones en redes de transmisión y distribución*, se reducen pérdidas y se incrementa la confiabilidad del suministro. No obstante, estos beneficios de la GD, existen riesgos asociados con los costos futuros de inversión y operación en GD principalmente, debido a que, ciertas tecnologías no han alcanzado madurez requiriendo condiciones especiales de operación distintas a las tradicionales. Considerando los últimos avances de la tecnología en relación con su funcionalidad técnica, tecnología de operación y eficiencia de producción las perspectivas de evolución de estos riesgos se prevén favorables. En definitiva se debe considerar la incertidumbre no-aleatoria de los costos de la GD a fin de analizar su competitividad respecto de las alternativas

tradicionales que incluyen las distintas etapas de la transformación y transporte.

3.7. Costos de la Energía en Diferentes Niveles de Suministro

Para valorar de una manera apropiada la competitividad de la GD en el problema de la PET, es necesario determinar el verdadero impacto de su instalación en los SEP. Uno de los aspectos más importantes a considerar es el nivel dentro de la cadena de suministro en que la GD será conectada. Para el efecto se debe considerar que los costos de la energía producida a nivel de los bornes de un generador centralizado, debido a los costos que implica el transporte y la distribución de la energía, se incrementan a medida que ésta es adquirida en niveles más cercanos a los centros de consumo.

Dichos costos son evitados mediante la conexión de GD por ubicarse cerca de los centros de consumo y corresponderían a los costos que se evitan de incurrir al no tener que proveer al SEP de un equipamiento adicional de transporte y/o distribución, o lo que es lo mismo a los costos marginales de modificar la red de transporte y/o distribución existente para satisfacer un incremento de demanda. La incertidumbre a modelar entonces se encuentra en la determinación de estos costos de transporte y distribución. Un camino para modelar razonablemente esta incertidumbre es pronosticar estos costos sobre la base de datos históricos. Se han distinguido las principales incertidumbres presentes diversas variables de la PET, ver Tabla 1. No obstante, esta primera apreciación puede cambiar en función del mercado eléctrico donde se lleve a cabo la tarea de la PET.

TABLA 1: Incertidumbres Relevantes del Problema de la PET

VARIABLE DE ENTRADA DE LA PET	INCERTIDUMBRE A MODELAR	SE ASUME	ALEATORIA	NO ALEATORIA
Costos Operativos del SEP	Precio de Combustibles Fósiles		X	
Costos de Expansión Actualizados	Tasa Libre de Riesgo	X		
Escenarios de Suministro de los Mercados Eléctricos	Momento de Ingreso Nueva Generación			X
	Disponibilidad de Generación		X	
Interconexiones Internacionales	Escenarios de Ingreso de Nueva Interconexión			X
	Precios de Compra y Venta de Energía			X
Costos de Inversión en Transmisión	Costos Equipamientos de Transmisión		X	
Inversiones en GD	Decisión de inversión en GD			X
Costos de Producción de la GD	Costo Energía en Diferentes Niveles de Suministro	X		
Pronóstico Espacial de la Demanda	Tasa de Crecimiento Anual		X	

4. MANEJO DE INCERTIDUMBRES

Una buena parte de los modelos de la PET existentes utilizados en la práctica asumen conocida con certeza la evolución de las variables del problema. Estos modelos se conocen como deterministas y para la modelación de parámetros inciertos utilizan únicamente sus valores esperados. Esta simplificación, hace que los modelos deterministas por sí solos sean, generalmente, inapropiados para obtener planes de expansión eficientes en la práctica. Existen también modelos estocásticos que consideran el comportamiento aleatorio de algunos parámetros de entrada como son la demanda, la disponibilidad del recurso hídrico y el comportamiento operación falla de las unidades de generación. Sin embargo, no se cuenta con antecedentes significativos respecto del manejo del riesgo asociado con las cuestiones financieras a pesar que son determinantes en los mercados desregulados.

A continuación se presentan tres caminos que en la actualidad existen para considerar las incertidumbres. El planificador, en función de los datos disponibles, y de la sofisticación del modelo a utilizarse podrá optar por uno de estos caminos.

4.1. Técnica de Escenarios

Dada la presencia de significativas incertidumbres en la PET, un camino ampliamente utilizado por planificadores para hacer frente al riesgo de tomar decisiones erróneas de inversión, es observar la sensibilidad de los resultados (obtenidos mediante una formulación determinista) ante diversos conjuntos de parámetros de entrada. Este análisis permite al planificador determinar cuán robusto o susceptible resultaría el plan propuesto en caso de producirse desviaciones en los pronósticos de diversas variables [7], [18]. Tiene la gran desventaja que es imposible realizar y sacar conclusiones de la gran cantidad de combinaciones – escenarios que deberían analizarse para adoptar una solución.

4.2. Análisis Probabilista

En caso de que el planificador disponga de una cantidad importante de datos históricos y tomando en cuenta que si bien no se puede pronosticar con absoluta certeza la evolución de parámetros con importantes incertidumbres, se podría afirmar que estos se encontrarán dentro de un rango de valores definidos mediante una curva de distribución de probabilidad. A diferencia del enfoque de escenarios, el análisis probabilista, mediante la aplicación de una técnica conocida como “Simulación de Montecarlo”,

permite cuantificar las consecuencias económicas a través de un gran número de escenarios futuros considerando sus respectivas probabilidades de ocurrencia y las correlaciones existentes entre las variables. Bajo esta perspectiva, la PET se formula como un problema de optimización estocástico cuyas principales suposiciones son: la reducción de todas las incertidumbres asociadas a las variables de entrada a una equivalente - resultante de certeza promedio asociada con los resultados, y la actitud pasiva del planificador ante la ocurrencia de escenarios adversos [9], [10]. Esto implica que los modelos de expansión probabilistas encontrarán soluciones satisfactorias únicamente si al final del horizonte de planificación se cumple tal equivalente de certeza promedio [10]. Debido a que es muy importante limitar las consecuencias económicas negativas que aparecen ante la ocurrencia de escenarios desfavorables ha surgido el análisis de riesgo [3].

4.3. Análisis de Riesgo

Es una herramienta utilizada por inversores y empresarios aplicada en la toma de decisiones de inversión bajo incertidumbres. Básicamente, consiste en localizar los riesgos que afectan las inversiones, evaluarlos económicamente, y finalmente aplicar una técnica que permita manejarlo eficientemente. Dentro del problema de la PET, una técnica de manejo de riesgo consiste en invertir en planes de expansión tales que en caso de ocurrir escenarios desfavorables permitan: ya sea hacer ajustes o cambios (inversiones contingentes) con facilidad y con costos menores, o resistir aceptablemente las circunstancias no previstas sin ningún cambio. Estas técnicas se conocen como flexibilidad y robustez, respectivamente [6].

A diferencia del análisis probabilista, la principal consideración del análisis de riesgo es la posición activa del planificador respecto a las incertidumbres [9]. Sobre la base de la literatura investigada se concluye que la aplicación del análisis de riesgo en la decisión de inversiones en transmisión es en la actualidad una herramienta de uso gerencial que se encuentra en etapa de desarrollo [10].

Sin embargo, en lo referente a la PET, el cual se trata de un problema de naturaleza particular donde están en juego no una sino un conjunto de inversiones secuenciales dentro de un horizonte de planificación, no existe una propuesta metodológica concreta para aplicar este enfoque en su resolución. En [11] se presenta un panorama general de lo que implicaría este tipo de formulación.

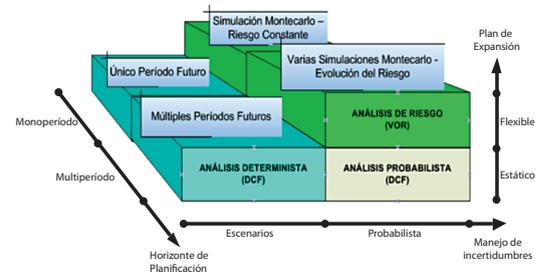


FIGURA 1: Planes obtenidos en Función del Tipo de Análisis de PET

En la Figura 1, en el eje vertical se muestran los planes de expansión obtenidos en función del tipo de formulación del problema de la PET, la cual puede realizarse ya sea desde el punto de vista de cómo ha sido considerado el horizonte de planificación (formulación monopériodo o multipériodo) o bien desde el punto de vista de cómo se manejan las incertidumbres (formulación determinista o probabilista). Se observa que, mediante la aplicación de formulaciones tradicionales (determinista y probabilista), las cuales hacen uso de la técnica de Flujo de Fondos Descontados (DCF por sus siglas en inglés) para la evaluación económica de la expansión, las soluciones obtenidas son planes estáticos de expansión. En cambio mediante la aplicación del análisis de riesgo, el cual requiere de herramientas sofisticadas de evaluación económica, al planificar contingencias (identificar, evaluar y mitigar el riesgo) la expansión no estaría más conducida por planes de expansión estáticos sino por estrategias de expansión que se adaptan a lo largo del horizonte de planificación a la ocurrencia de escenarios adversos.

5. ASPECTOS A INCORPORARSE EN LOS NUEVOS MODELOS DE LA PET

En las secciones anteriores se ha analizado con cierta profundidad la problemática actual de la PET. Antes de proceder a plantear los aspectos que deben incorporarse en los nuevos modelos de expansión de transmisión, es importante, considerando los requerimientos de los mercados eléctricos modernos, reconocer la necesidad de establecer un esquema estructurado que permita al ente encargado de la planificación centralizada conducir en la práctica, de una manera satisfactoria, la expansión del sistema de transmisión.

5.1. Ineficacia de Planes de Expansión Estáticos

No obstante existir variables inciertas cuya evolución a lo largo del horizonte de planificación puede ser

pronosticada razonablemente, como es el caso de la demanda o de la tasa de descuento libre de riesgo, existen variables tales como el momento de ingreso de una nueva central de generación o de una interconexión internacional, donde las significativas incertidumbres presentes hacen prácticamente imposible pronosticar su evolución. Por lo tanto, para enfrentar de una manera adecuada el problema de la PET, el primer paso es reconocer que los planes estáticos obtenidos mediante modelos ya sean éstos deterministas o probabilistas, lograrán en la práctica la expansión óptima del sistema de transmisión, únicamente si se cumplen con buena aproximación todas las suposiciones realizadas por el planificador durante el horizonte completo de planificación. Esta situación es muy difícil de que acontezca y por lo expuesto en la Sección 4, la aplicación de una técnica de manejo de riesgo será el camino apropiado para enfrentar las incertidumbres.

5.2. Nuevas Alternativas de Decisión

Las inversiones en transmisión son irreversibles. Debido a la existencia de economías de escala son intensivas en capital y poco frecuentes. Con limitados rangos disponibles de capacidad se caracterizan por sus bajos niveles de adaptabilidad a la expansión y con largos tiempos de vida útil se realizan ante la presencia de importantes incertidumbres lo que hace que los riesgos presentes en las decisiones de inversión sean considerables. No obstante su irreversibilidad, existe cierto grado de libertad en lo que respecta al momento en el que se concretará su construcción, es decir el inversionista no se encuentra en una posición de “ahora o nunca” y tomará la decisión una vez que ciertas incertidumbres sean convenientemente disipadas de tal forma que garanticen el retorno esperado durante la vida útil del proyecto [3].

Sin tomar en cuenta los considerables riesgos afrontados por el planificador al decidir llevar a cabo un plan estático de expansión (Sección 5.1), las características de las inversiones en transmisión hacen que el problema tenga una naturaleza especial en el que las soluciones que se pueden encontrar son limitadas, poseen bajos niveles de adaptabilidad, son irreversibles y requieren grandes esfuerzos en tiempo y capital. Se considera que la incorporación de un conjunto de nuevas alternativas de decisión, actualmente, factibles desde el punto de vista técnico y económico, permitirá al planificador contrarrestar las limitaciones propias del problema, es decir incrementar los niveles de adaptabilidad y flexibilidad de los planes tradicionales de expansión, así como también, mitigar considerablemente los riesgos presentes. Dado que en los últimos años

han tenido un creciente desarrollo, una de las alternativas es invertir en tecnologías de Generación Distribuida (GD).

Éstas al ser inversiones flexibles, es decir no intensivas en capital, reversibles en gran medida, admiten incrementos modulares de capacidad y requieren menores tiempos de ejecución, permiten proponer una mayor cantidad de soluciones con mejores niveles de adaptabilidad, menores esfuerzos, menores riesgos comprometidos, así como también, permiten al planificador incorporar la opción de diferir grandes proyectos de expansión en transmisión.

Existen también otras alternativas relacionadas con los avances de la electrónica de potencia y específicamente mediante el uso de dispositivos FACTS. Estos elementos instalados estratégicamente en la red de transmisión son capaces de modificar controladamente los flujos por las líneas y los niveles de tensión en los nodos de transmisión, pudiendo llegarse a diferir grandes proyectos de transmisión, así como también, obtener mejores niveles de adaptabilidad en la expansión.

5.3. Flexibilidad Estratégica en el Manejo de Incertidumbres

En la etapa previa a la desregulación la flexibilidad estaba asociada con las características operativas de los SEP. Sin embargo en los últimos años, la técnica de invertir en flexibilidad [9] para mitigar los riesgos financieros se ha desarrollado y ha adquirido un creciente interés a nivel de investigadores y planificadores de las industrias: petrolera, de gas natural, y en menor grado de la eléctrica, donde ha sido aplicada inicialmente en las inversiones de generación [14], [17].

Si bien [15] y [16] analizan la flexibilidad de un plan de expansión de transmisión, sin embargo el concepto de flexibilidad no es aplicado como un recurso (conjunto de alternativas flexibles) que el planificador podría utilizar estratégicamente para reducir los riesgos presentes en las políticas de inversión tradicionales, y de esta manera conducir satisfactoriamente la expansión. Dado que al ser un concepto relativo, es decir, que se valora en relación a una decisión inflexible, la flexibilidad tiene valor únicamente cuando, considerando los riesgos asociados, las economías de escala dejan de ser la opción preferida dando paso a las opciones flexibles ($Flexibilidad \geq 0$).

Las características de los proyectos de transmisión, la capacidad del planificador de participar activamente

en las decisiones de expansión, las importantes incertidumbres presentes, así como la disponibilidad de alternativas adicionales de inversión cada vez más eficientes, hacen de la flexibilidad una técnica con excelentes perspectivas de aplicación en el problema de la PET para reducir eficientemente los riesgos presentes en los planes de expansión tradicionales.

5.4. Técnica de Valoración de Estrategias de Expansión

En el instante en que se concreta una inversión, automáticamente desaparecen las diversas opciones de inversión que tenía la empresa, como son: posponer la decisión en espera de que información entrante resuelva aceptablemente (de acuerdo a la percepción del inversionista) las incertidumbres, o abandonar la inversión para invertir en otro rubro. El valor de estas opciones reales, análogo al valor de una opción financiera del tipo "call", es un costo de oportunidad en el que incurren las empresas al momento de tomar la decisión y debe ser incluido como componente de los costos de inversión. Es muy importante entonces expresar el valor de estos costos de oportunidad u opciones reales en términos económicos. Sin embargo, esta tarea no es sencilla y para hacerla factible es indispensable utilizar una sofisticada herramienta de evaluación de inversiones como lo es el Método de Valoración de Opciones Reales (VOR) [3], [17].

Se establece que la irreversibilidad, la incertidumbre y la capacidad de diferir la inversión, interactúan en el tiempo para afectar de distinta manera el valor de las opciones reales [3]. Por lo expuesto, en la Sección 5, las variables del problema de la PET interactúan de la misma manera al momento que se decide por un plan estático de expansión, con la diferencia de que no es una inversión la que será evaluada en esta investigación sino un conjunto de inversiones secuenciales. De igual manera, el planificador incurre en costos de oportunidad que aparecen por prescindir de la flexibilidad que podrían brindar determinadas alternativas.

Dado que con el método VOR es posible determinar, en cada período de estudio, los costos de oportunidad que se encuentran embebidos en las inversiones, los cuales son invisibles para las técnicas tradicionales de evaluación, se propone, considerando las características de la PET, extender la aplicación de este método para la valoración de la flexibilidad embebida en un plan de expansión (múltiples proyectos) y bajo este enfoque elaborar una herramienta para construir estrategias de expansión satisfactorias en la práctica.

En la Sección 6 se propone un procedimiento a través del cual se logran reducir eficientemente los riesgos presentes en el problema de la PET. Los resultados de este análisis permiten al planificador tomar decisiones en cada período de estudio en función de los escenarios ocurridos y de los que podrían acontecer durante el horizonte de planeamiento. Las alternativas de decisión comprenden ya sea invertir en proyectos de transmisión, o bien, mediante inversiones flexibles, diferir grandes inversiones a la espera de nueva información. Adicionalmente, será posible determinar el momento en que deben llevarse a cabo las decisiones de inversión.

5.5. Información Útil de los Enfoques Tradicionales

Es importante señalar que aún cuando los modelos tradicionales de expansión de la transmisión con frecuencia entregan resultados ineficientes desde el punto de vista práctico (planes estáticos), una etapa de análisis de riesgo con resultados satisfactorios depende completamente de la capacidad del planificador para tomar ventaja de la valiosa información contenida en dichos modelos. Con la formulación determinista, el planificador, mediante la aplicación de la técnica de escenarios, puede llevar a cabo un análisis de sensibilidad cuyo resultado le servirá para establecer la importancia y los efectos (desde el punto de vista técnico y económico) de las diversas variables inciertas del problema, e identificar las incertidumbres a ser modeladas con mayor detalle. Dentro de la formulación probabilista se modelan las principales incertidumbres aleatorias del problema de una manera estocástica. Como resultado de este análisis, el planificador obtendrá rangos que representan los posibles escenarios de desempeño de la expansión a lo largo del horizonte de planificación, o lo que es lo mismo, la evolución del riesgo de un plan estático de expansión.

Por tanto, a fin de identificar las incertidumbres relevantes así como para cuantificar la evolución del riesgo presente en un plan estático de expansión se propone hacer uso de la información contenida en los análisis tradicionales determinista y probabilista.

6. OBTENCIÓN DE ESTRATEGIAS DE EXPANSIÓN FLEXIBLES – ENFOQUE PROBABILISTA

De acuerdo a la literatura investigada, existe un buen nivel de consenso entre autores respecto al procedimiento a seguir en la resolución de problemas prácticos de decisión de inversiones bajo incertidumbres mediante la aplicación de la

metodología VOR [3], [11], [12], [17]-[20]. El proceso de localización, evaluación y reducción de los riesgos presentes en un plan de expansión, en este trabajo se divide en cuatro etapas que van desde la selección del plan estático sobre el que se incorporará la etapa de análisis de riesgo, hasta la obtención de una estrategia de decisiones que podrá disponer el planificador a lo largo del tiempo.

6.1. Plan de Expansión Estático. Punto de Partida

Dado que la flexibilidad es un término relativo, ésta se medirá con respecto a una estrategia de inversión de referencia [9]. Siguiendo este enfoque, el plan de expansión estático será la estrategia de inversión de referencia por carecer de flexibilidad (*Flexibilidad=0*).

En esta etapa inicial mediante un análisis de sensibilidad de la función objetivo (*FO*), que en este trabajo se asume como el valor esperado de los costos totales de expansión, ver ecuación (1), se determina la relevancia de cada una de las variables del problema como por ejemplo, tasa de descuento anual, evolución de la demanda, precio de los combustibles, ingreso de una nueva central de generación, etc. ($\bar{r}, \bar{D}, \bar{f}, \bar{t}, \bar{d} \dots$) [21].

$$E[FO] = E[C_T(X_{n,t_k})] \Big|_{(\bar{r}, \bar{D}, \bar{f}, \bar{t}, \bar{d} \dots)_a^t} \quad (1)$$

Donde:

- X_{n,t_k} : Proyecto de transmisión *n* decidido en el período t_k
- t : Período de decisión t
- T : Horizonte de planificación o último período de decisión
- $C_T(X_{n,t_k})$: Valor presente de los Costos Totales de expansión
- $(\bar{r}, \bar{D}, \bar{f}, \bar{t}, \bar{d} \dots)_a^t$: Conjunto de variables de entrada modeladas de una manera determinista que representan el escenario a durante el año t

6.2. Evaluación del Riesgo del Plan Estático

Las incertidumbres relevantes del problema son modeladas mediante funciones de densidad de probabilidad y con el método de Montecarlo se obtiene mediante simulación un conjunto de valores que podría

tomar la función objetivo en cada período $FO_{a,T}$, ver ecuación (2), los cuales se encuentran dentro de una banda $FO_{Tmin} \leq FO_T \leq FO_{Tmax}$. Con esta información se determina los posibles desempeños del plan estático a lo largo del horizonte de planificación, donde las probabilidades de incremento o decremento del valor de la *FO* con respecto al valor esperado en cada período $p_i(T)$ son conocidas.

$$FO_{a,t} = C_T(X_{n,t_k}) \Big|_{(\bar{r}, \bar{D}, \bar{f}, \bar{t}, \bar{d} \dots)_a^t} \quad (2)$$

Donde:

- $(\bar{r}, \bar{D}, \bar{f}, \bar{t}, \bar{d} \dots)_a^t$: Combinación aleatoria a de variables de entrada aleatorias y deterministas que representan un posible escenario durante el año t

A diferencia de la formulación probabilista de la PET, la cual hace uso únicamente de la información contenida en el desempeño esperado de la expansión para encontrar la solución, en esta etapa se hace uso de la información adicional que representa la volatilidad de dicho desempeño para determinar la evolución del riesgo presente en un plan de expansión estático. Con el objeto de visualizar la etapa de valoración de las opciones flexibles, generalmente el desempeño del plan de expansión de referencia, suele representarse mediante un árbol de eventos [11], [12], [18], [19] y [22], ver ecuación (4).

6.3. Generación de Estrategias Candidatas

Por lo expuesto en la Sección 5.2, las inversiones en GD presentan características favorables para la obtención de estrategias de expansión adaptables a las circunstancias cambiantes de la PET y, consecuentemente, para la implementación de la formulación propuesta en este trabajo. Por tal motivo, las nuevas variables de decisión consideradas en este trabajo son: invertir en GD y diferir proyectos de expansión de la transmisión. Una vez determinados los riesgos presentes al haber decidido por un plan estático, el objetivo de esta etapa es, mediante la incorporación de opciones flexibles de decisión, construir diversas estrategias de expansión candidatas. Es importante resaltar que la *FO* que evalúa el desempeño de las estrategias generadas en esta etapa, al ser consideradas nuevas alternativas de decisión, incorpora nuevos componentes.

6.4. Valoración de Flexibilidad de las Estrategias

La valoración de las opciones flexibles es un problema de decisión multiperíodo donde el tiempo juega un rol importante ya que cuando el planificador toma la decisión en el presente, al mismo tiempo se debe considerar todo lo que podría acontecer en el futuro. Para encontrar solución a este problema se recurre a la herramienta de la Programación Dinámica por sus particularidades intrínsecas para el manejo de incertidumbres ya que permite descomponer toda una secuencia de decisiones en sólo dos componentes: la decisión inmediata π y una función de valoración

que encapsula las consecuencias de las decisiones subsiguientes ϵ_r [3].

El proceso de resolución básicamente inicia en el último período de decisión T y consiste en resolver varios problemas de optimización tradicional estática planteados en la ecuación (3) y con las soluciones obtenidas se podrán evaluar las funciones de valoración del penúltimo período de decisión FT-1, las cuales a la vez servirán para evaluar las funciones de valoración del antepenúltimo período de decisión y así sucesivamente, hasta llegar a la decisión presente quedando de esta manera construidas diversas estrategias de expansión a seguir por el planificador en caso de ocurrir diversos escenarios, ver ecuación (4).

Un ejemplo práctico de aplicación de la metodología propuesta en este artículo es presentado en [21] donde se analiza el problema de decisión que enfrenta una empresa minera, ubicada en un sitio alejado de la red de transmisión, para satisfacer sus requerimientos futuros inciertos de energía eléctrica partiendo de un conjunto de estrategias con diversos niveles de flexibilidad.

$$\min_{X_{n,t_k}, GD_{q,t_k}} \{FO_s^T\} = \min_{X_{n,t_k}, GD_{q,t_k}} \{C_T(X_{n,t_k}, GD_{q,t_k})\} \quad (3)$$

$$F^{T-1} = \min_{GD_{q,t_k}} \left\{ p(X_{n,t_k}^{T-1}, GD_{q,t_k}^{T-1}) + \frac{1}{1+r} e_{T-1}[F^T] \right\} \quad (4)$$

$$F^T = \min \left\{ \min_{X_{n,t_k}, GD_{q,t_k}} \{FO_s^T\}, C_T(X_{n,t_k}) \right\} \quad (5)$$

Donde

- FO_s^T : Costos Totales de Expansión del camino s en el período de decisión T
- F^T : Función de Valoración de opciones reales en el período de decisión T
- $p(X_{n,t_k}^{T-1}, GD_{q,t_k}^{T-1})$: Función de valoración de costos inmediatos incurridos al tomar una decisión en T
- $e_{T-1}[F^T]$: Función de expectativa de la F^T calculada con probabilidades acumuladas $p_i(T-1)$

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La regla del Valor Presente Neto (VPN) es la base de la teoría neoclásica económica para evaluación de inversiones, sin embargo, no considerar las posibles consecuencias económicas de las decisiones de inversión irreversibles es una simplificación que bajo ambientes de incertidumbre podría llevar a una toma de decisiones errónea la cual se origina al ignorar el valor que adquieren las alternativas flexibles.

La incorporación de GD como nueva alternativa de inversión permite entregar tanto flexibilidad como mejores niveles de adaptabilidad a la expansión del sistema de transmisión. Un incremento del reducido espectro de alternativas tradicionales basadas, fundamentalmente, en grandes proyectos de transmisión es logrado mientras además es posible llegar a diferir grandes proyectos de expansión.

Han sido planteados nuevos fundamentos para propiciar un cambio de paradigma con respecto al problema de la PET al proponer que la expansión del sistema de transmisión no siga siendo conducida mediante planes de expansión estáticos obtenidos a través de un proceso de evaluación - optimización tradicional, sino a través de la incorporación de una etapa de análisis de riesgo cuyo resultado es un conjunto de estrategias de expansión que se adaptan a la naturaleza dinámica de los mercados eléctricos modernos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] LATORRE G., CRUZ R.D., Areiza J.M., VILLEGAS A.; Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, Mayo 2003.
- [2] LEE C. W., Ng S.K.K., ZHONG J., WU F.F.; Transmission Expansion Planning From Past to Future, IEEE PES Power Electric Systems Conf. and Exposition, PSCE, Octubre 2006.
- [3] DIXIT A. K., PINDYCK R. S.; Investment under Uncertainty, Princeton University Press, New Jersey, Enero 1994.
- [4] RUDNICK H.; The Challenges of Transmission Expansion in the Chilean Power Sector: Market or Central Planning, IEEE PES General Meeting Toronto, Junio 2004.
- [5] IEE UNSJ; Despacho Económico de Sistemas Hidrotérmicos en Mercados Competitivos, Instituto de Energía Eléctrica IEE, UNSJ - Argentina, Octubre 2005.
- [6] BUYGI M.O., SHANECHI H.M., BALZER G., SHAHIDEHPOUR M., PARIZ N.; Network Planning in Unbundled Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, Agosto 2006.
- [7] ANDREWS C. J.; Evaluating Risk Management Strategies in Resource Planning, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, Febrero 1995, Woodrow Wilson School, Princeton University, pp. 420 - 426.
- [8] ROSS T. J.; Fuzzy Logic with Engineering Applications, Segunda Edición 2004, Universidad de Nuevo México USA.
- [9] KU A., WAGLE P., MILLER A., CHRISTIAN J., SIOSHANSI F. P., HINRICHS L., EYDELAND A., WOLYNIK K., DYNER I., LARSEN E., LOMI A.; Risk

and Flexibility in Electricity, Published by Risk books a division of Incisive RWG Ltd., 2003.

- [10] MIRANDA V., PROENÇA L. M.; Why Risk Analysis Outperforms Probabilistic Choice as the Effective Decision Support Paradigm for Power Planning, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, Mayo 1998, pp. 643 - 648.
- [11] RAMANATHAN B., VARADAN S.; Analysis of Transmission Investments using Real Options, IEEE PES Power Systems Conf. and Exposition PSCE '06, Nov. 2006.
- [12] HEDMAN k. W., GAO F., SHEBLÉ G.B.; Overview of Transmission Expansion Planning Using Real Options Analysis, IEEE Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, Octubre 2005, pp.497 - 502.
- [13] KIRSCHEN D., STRBAC G.; Fundamentals of Power Systems Economics, John Wiley and Sons, Enero 2004.
- [14] HOBBS B. F., HONIOUS J.C., BLUESTEIN J.; Estimating the Flexibility of Utility Resource Plans: an Application to Natural Gas Cofiring for SO2 Control, IEEE Transactions on Power Systems, Febrero 1994.
- [15] LU M., DONG Z.Y., SAHA T.K., Transmission Expansion Planning Flexibility, The 7th International Power Engineering Conf., Dec. 2005, pp. 893 – 898.
- [16] FALVO M. C.; An Approach for Transmission System Expansion Planning in Electricity Market, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Junio. 2006.
- [17] MUN Johnathan; Real Options Analysis - Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions, John Wiley and Sons Inc., Hoboken New Jersey, Enero 2002.
- [18] LÓPEZ DUMRAUF G.; Tendencias en valuación: 4 Pasos para Incluir el Valor de las Opciones Reales, IAEF Instituto Argentino de Ejecutivos de Finanzas No. 187, Octubre 2003.
- [19] YANG M., BLYTH W.; Modelling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach, International Energy Agency IEA Working Paper Series, Febrero 2007.
- [20] PALACIOS F., RAYO S., HERRERÍAS R., CORTÉS A.; Valoración de la Flexibilidad de Proyectos de Inversión Mediante Opciones Reales. El VAN Ampliado, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de Granada 1er. Encuentro

Iberoamericano de Finanzas y Sistemas de Información, nov - dic 2000, Jerez de la Frontera, Universidad de Cadiz, Dic 2000, pp. 306 - 321.

- [21] VÁSQUEZ P., OLSINA F.; Valuing Flexibility of DG Investments in Transmission Expansion Planning, IEEE PES Power Tech 2007 Europe Conf., Lausanne Switzerland, Julio 2007.
- [22] OLAFSSON S.; Making Decisions Under Uncertainty - Implications for High Technology Investments, BT Technology Journal, Abril 2003, Vol. 21, No. 2, pp. 170.



Paúl Vásquez Miranda.- Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la “Escuela Politécnica Nacional,” Quito - Ecuador en el año 2002. Durante el año 2003 trabajó con la Empresa de Telecomunicaciones Bellsouth en el Departamento de Ingeniería.

Actualmente se encuentra realizando su trabajo de investigación previo a la obtención del título de Ph.D. en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan (IEE - UNSJ) - Argentina. Sus áreas de interés son Planificación, Decisión de Inversiones Bajo Incertidumbre, Métodos Heurísticos de Optimización y Análisis de Riesgo.



Alberto Vargas Prado.- Es actualmente profesor de Postgrado en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan (IEE - UNSJ) - Argentina. Obtuvo el título de Ingeniero Electromecánico en 1975 en la “Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza” y el grado de Ph.D. en Ingeniería Eléctrica en el año 2001 en la UNSJ.

Desde 1985 es Director del Grupo de Investigación en Mercados Eléctricos Competitivos en el IEE - UNSJ. En el ámbito privado es Director de Proyectos en ASINELSA S.A., Empresa especializada en el desarrollo de software para Empresas de Distribución de Energía Eléctrica en el Área de los AM/FM GIS y Sistemas DMS - OMS.