

## **Impacto de las inversiones en el perfil de riesgo de portafolios de inversión en el Sistema Interconectado Nacional del Paraguay**

**Félix Fernández, Marcelo Dávalos, Gerardo Blanco**  
**Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, Facultad Politécnica - UNA**  
**Paraguay**

### **RESUMEN**

El incremento del consumo de energía eléctrica podría beneficiar el crecimiento económico de un país; sin embargo, este crecimiento debe ir acompañado de una expansión adecuada del sistema de transmisión (ST). Por otro lado, el desarrollo experimentado por los dispositivos de electrónica de potencia y la disminución progresiva de sus costos han hecho posible incluir Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) en los sistemas eléctricos. Dichos dispositivos tienen la habilidad de alterar los parámetros de una red eléctrica. Estas características convierten a la utilización de los FACTS en una atractiva estrategia para disminuir la congestión en la red de transporte e incrementar la capacidad de transferencia de los flujos de energía. Además, otra alternativa para afrontar esta deficiencia es la instalación de compensación serie fija (FSC), con el fin de aumentar el uso de la capacidad de transmisión existente que permite operar la red cerca de los márgenes establecidos de seguridad, y, en consecuencia, el flujo de potencia a través de las líneas de transmisión (LTs) existentes. Por lo tanto, sería posible aplazar la inversión en la construcción de nuevas LTs. Sin embargo, la utilización de estas tecnologías son aún limitadas, debido al alto costo de inversión y la ausencia de herramientas que cuantifiquen sus beneficios económicos.

Las inversiones en la red de transporte exhiben numerosas características, tales como: elevado grado de irreversibilidad, economías de escala y baja adaptabilidad. Estas características las hacen vulnerables a los riesgos generados por la evolución incierta de los mercados eléctricos. Esto origina un importante incremento en los costos de inversión, afectando la factibilidad financiera de los proyectos. En este contexto, es necesaria la utilización de la flexibilidad estratégica, de modo a hacer frente de una forma activa a los riesgos que afectan el desempeño de las inversiones durante su horizonte de evaluación.

Las inversiones en la red de transporte dan la opción de diferir o expandirla en una etapa posterior. Así, se debe contemplar el valor de la flexibilidad de estas opciones. Este valor no es posible incorporarlo en el análisis del Valor Presente Neto. En estos casos la herramienta apropiada para la evaluación de inversiones se basa en la noción de Opciones Reales (RO). El método de RO proporciona un marco de trabajo basado en la teoría de opciones financieras, para evaluar las inversiones flexibles en condiciones de incertidumbre.

Por lo tanto, se propone un enfoque para la evaluación de inversiones en el ST bajo incertidumbre donde es considerada la opción de diferir grandes inversiones en LTs, comparando con inversiones en dispositivos FACTS o inversiones en FSC. Consecuentemente, el impacto de los dispositivos debe ser analizado, a través de simulaciones estocásticas según el beneficio social del sistema. Estas simulaciones replican el desempeño de las alternativas de inversión en el mercado eléctrico.

Se ha aplicado la metodología propuesta para el sistema eléctrico paraguayo comparando las inversiones de los refuerzos tradicionales de la red (LTs y FSC) con dispositivos FACTS. Se ha analizado el impacto de estos activos y el incentivo para la ejecución de las inversiones. Por último, el caso de estudio muestra la mejora del beneficio social mediante la combinación estratégica de estas alternativas, y el sistema de transmisión se adapta gradualmente al mercado eléctrico incierto.

### **PALABRAS CLAVES**

Gestión de la congestión, flexibilidad, planificación del sistema de transmisión, Monte Carlo, programación dinámica, simulación estocástica, compensación en serie, incertidumbre.

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo del sector eléctrico debido al aumento de la demanda de electricidad es un factor clave para el desarrollo de un país; no obstante, la expansión debe ser sostenida en cuanto a capacidad de transmisión y generación de energía eléctrica, que, como sucede generalmente constituye el principal obstáculo para el crecimiento industrial. Por lo tanto, el sistema de transmisión (ST) es la piedra angular en el que depende la coordinación entre oferta y demanda de electricidad. Las redes existentes fueron diseñadas para la transmisión de grandes bloques de energía, desde la generación a los puntos de distribución para el consumo final, de acuerdo con niveles de confiabilidad predefinidos. En este sentido, la red de transmisión debe evolucionar para ser capaz de cumplir su papel en función de las necesidades futuras de la demanda.

Actualmente, las redes no están adaptadas a los nuevos patrones de flujo de potencia de los mercados de energía y, en consecuencia, las líneas de transmisión (LTs) tienen importantes niveles de congestión. Esto tiene un impacto perjudicial en el desarrollo de los sistemas, ya que reduce significativamente los niveles de confiabilidad del suministro de energía. En ese sentido, las áreas con un crecimiento económico sostenido requieren inversiones frecuentes y significativas en la expansión de la capacidad de las redes de transporte.

El problema de expansión de la transmisión se caracteriza por la naturaleza de las inversiones involucradas. Economía de escala, irreversibilidad y capital intensivo son algunas de las características de las inversiones en la expansión de la red. Además, los activos de transmisión son de larga vida. Por lo tanto, el valor de la inversión se amortiza en un período de tiempo largo y depende de otros desarrollos. Consecuentemente, las inversiones en transmisión están expuestas de manera significativa a las incertidumbres. Dichas incertidumbres involucradas en la planificación de la expansión son mejor adaptadas con las inversiones flexibles. Es necesaria la flexibilidad para aprovechar las oportunidades o evitar pérdidas ante la ocurrencia de escenarios desfavorables. Esta flexibilidad puede incluir diversas acciones en diferentes etapas del horizonte de inversión. En este contexto, la flexibilidad tiene un valor sustancial y debe tenerse en cuenta en la toma de decisiones.

Obviamente, las inevitables incertidumbres asociadas con las Inversiones en Transmisión (ITs) son mejor manejadas con la flexibilidad en lugar de las expectativas de escenarios fijos que asume implícitamente el enfoque de Flujo de Fondo Descontado. La flexibilidad estratégica es una técnica de manejo de riesgos que ha adquirido gran importancia, ya que permite gestionar adecuadamente las incertidumbres que no se han resuelto en el momento de tomar decisiones de inversión. Sin embargo, expresar el valor de la flexibilidad en términos económicos no es una tarea trivial y requiere de herramientas sofisticadas de valoración [1]. La técnica de valoración de Opciones Reales (RO) proporciona un marco de trabajo bien fundamentado basado en la teoría de opciones financieras para evaluar las inversiones estratégicas bajo incertidumbre [1]. El enfoque de RO da una nueva visión sobre el efecto de la incertidumbre en un problema de evaluación de inversión, la visión que se opone al pensamiento tradicional. Cuando el manejo se posiciona de forma asimétrica para capitalizar oportunidades de crecimiento, pero, al mismo tiempo, reducir pérdidas en el decremento, más incertidumbre en realidad puede ser beneficiosa cuando se valora las opciones de inversiones. Las ganancias se pueden realizar en mercados inciertos o volátiles mediante la organización de la inversión debido al potencial de crecimiento y las pérdidas limitadas por decremento, ya que el manejo puede incumplir las inversiones planificadas o simplemente no pasar a la siguiente etapa [2].

Las ITs incluyen la flexibilidad intrínseca de múltiples opciones estratégicas, tales como: la opción de expandir en una etapa posterior, posponer y/o abandonar la inversión más adelante [3]. Por lo general, los refuerzos de la red se centran principalmente en las inversiones en nuevas LTs. Este tipo de ITs tienen un gran nivel de irreversibilidad, lo que conduce a un alto riesgo de exposición a las incertidumbres. Una alternativa para lidiar con estas deficiencias es la instalación de compensación serie fija (FSC), de manera a aumentar el uso de la capacidad de transmisión existente que permita operar la red cerca de los márgenes de

seguridad establecidos, y por lo tanto, el flujo de potencia se puede elevar a sus límites térmicos a través de las LTs existentes [3]. Consecuentemente, sería posible diferir la inversión para construir nuevas LTs [4].

Además, la expansión convencional de la red podría no ser la mejor manera de lidiar con algunas restricciones, especialmente las que surgen debido a la falta de control de los flujos de potencia [3]. Desde este punto de vista, otra opción para hacer frente a la falta de control del flujo de potencia es la instalación de Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS), particularmente los Capacitores Series Controlado por Tiristores (TCSC), en lugar de construir LTs. Los TCSCs son compensadores de reactancia capacitiva, que consisten en un banco de capacitores en serie conmutado por un reactor controlado por tiristores. Una de sus características es el control vernier. Dicho control permite al TCSC variar la impedancia efectiva de la LT. Esta compensación continua, dinámica y flexible podría ser significativamente valiosa de acuerdo con el desarrollo incierto de la evolución del mercado de energía.

La ventaja del FSC sobre el TCSC es que el costo es mucho menor. Además, las inversiones en este tipo de dispositivos exhiben características que mejoran notablemente su flexibilidad, por ejemplo, modularidad y mayor reversibilidad. Por lo tanto, la inclusión de estas alternativas en los portafolios de ITs añade nuevas opciones estratégicas para el plan de expansión de la red. Esta flexibilidad es relevante con el fin de tomar decisiones óptimas de ITs y debe ser justamente valorada. Cualquier intento de valorar la flexibilidad casi naturalmente lleva a la noción de Opciones Reales (RO) [1].

Modelos de RO a menudo presentan mayor complejidad que los financieros. Ciertamente, los proyectos reales exhiben un complejo conjunto de opciones que interactúan, lo que complica su evaluación. En este contexto, Longstaff *et al.* [5] propuso un método para resolver la interacción de las opciones financieras, basado en simulaciones de Monte Carlo. Últimamente, Gamba [6] reportó una extensión de este enfoque para la valoración de los problemas de inversión con opciones incorporadas considerando la interacción y la interdependencia entre ellos.

Este artículo extiende el enfoque propuesto en [7] - [8] para el problema de expansión de la transmisión con RO integradas y fijas. Por lo tanto, se consideran inversiones en FSC, TCSC y LT como alternativas de ITs, la valoración de la flexibilidad, así como la opción de diferimiento en los proyectos de expansión. El objetivo de este trabajo es el esclarecimiento sobre el valor del control del flujo de potencia a través de los dispositivos mencionados, con el fin de mejorar los planes de expansión permitiendo una adaptación de la red a los escenarios cambiantes. En un caso de estudio, se comparan las alternativas de expansión con el fin de explorar las señales de inversión que cada enfoque proporciona.

## 2. CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA MEDIANTE FACTS Y FSC

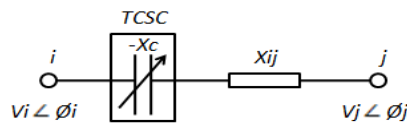
El objetivo de esta sección es ilustrar la ventaja de una mayor flexibilidad proporcionada por el uso de un TCSC en lugar de un FSC en un sistema eléctrico. El modelo matemático del TCSC es desarrollado en base a su operación en régimen permanente, donde mediante la modificación de la reactancia de la LT a la que está instalado, el TCSC actúa como compensador inductivo o capacitivo [7]. Su capacidad depende de la reactancia y la corriente máxima que transporta dicha LT, así la reactancia equivalente donde está conectado el FACTS, queda definida por:

$$X = X_{ij} + X_{TCSC}; X_{TCSC} = r_{TCSC} \cdot X_{ij} \quad (1)$$

Donde  $X_{ij}$  es la reactancia de la LT y  $r_{TCSC}$  es el coeficiente que representa el grado de compensación del TCSC. Para evitar la sobre compensación el rango de trabajo del TCSC es adoptado entre  $-0.7 X_{ij}$  y  $0.2 X_{ij}$ .

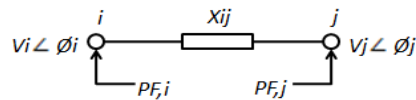
Los dispositivos FACTS se modelan a través del Modelo de Inyección de Potencia (MIP) [9], lo que representa el atributo de control como una inyección de potencia en los nodos entre los que está conectado. Por lo tanto, esta potencia es una función de los parámetros de control del dispositivo. En la Fig. 1 se ve una LT compensada por un TCSC, en la que se formula la susceptancia equivalente entre los nodos  $i$  y  $j$  como:

$$b_{ij} = \frac{1}{(X_{ij} \pm X_{TCSC})} \quad (2)$$



**Figura 1: Circuito equivalente del TCSC**

El circuito equivalente MIP de una LT con TCSC instalado bajo la suposición de flujo de potencia DC se muestra en la Fig. 2, en la que los componentes de los FACTS se sustituyen por dos inyecciones de potencia en ambos lados de la línea de transmisión.



**Figura 2: Modelo MIP del TCSC**

Las inyecciones de potencia se formulan de acuerdo con el tipo de FACTS que se está modelando. Para un TCSC, la inyección de potencia se puede derivar como:

$$P_{F,i} = -P_{F,j} = \frac{X_{TCSC}}{X_{ij}(X_{ij} - X_{TCSC})} \cdot (\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

Las inyecciones de potencia son funciones de los ángulos de voltaje, que son las variables de estado en el modelo DC-OPF, no hay límites fijos para estas inyecciones de potencia (existen límites fijos para  $X_{TCSC}$ ). Por lo tanto, las restricciones de operación del TCSC son dos restricciones adicionales de desigualdad, que son añadidas al problema de optimización del OPF:

$$P_{F,i} + \frac{X_{TCSC}^{max}}{X_{ij}(X_{ij} - X_{TCSC}^{max})} \geq 0; \quad (4)$$

$$P_{F,i} + \frac{X_{TCSC}^{min}}{X_{ij}(X_{ij} - X_{TCSC}^{min})} \leq 0; \quad (5)$$

Los cálculos se llevaron a cabo con el modelo de red de manera a aumentar la capacidad del corredor de transmisión donde se han encontrado niveles considerables de congestión, como consecuencia de un análisis de contingencia simple utilizando el criterio N-1, estas zonas se equipan con un TCSC o un FSC en serie. La impedancia equivalente en función del ángulo  $\alpha$  de disparo del TCSC se calcula de acuerdo con [10] - [11]. Se asume que el ángulo de disparo del TCSC puede ser controlado en pasos de  $1^\circ$ .

El nivel de compensación difiere para diferentes distribuciones de carga. El TCSC provee flexibilidad para aumentar la potencia activa transmisible. Si un FSC es aplicado en lugar de un TCSC, entonces el nivel de

compensación no es más ajustable. Este tipo de control del flujo de potencia es sólo óptimo para una sola distribución de carga. Para otras distribuciones de carga la potencia máxima transmisible se reduce en comparación con la aplicación de un TCSC. En sistemas reales de transmisión, ocurren muchas incertidumbres y frecuentemente suceden cambiando escenarios de flujo de potencia.

### 3. VALORACION DE INVERSIONES FLEXIBLES EN EL SISTEMA DE TRANSMISION

Últimamente, la planificación del ST tiende a aumentar drásticamente su complejidad debido al contexto de la naturaleza incierta de los escenarios futuros. El enfoque tradicional utilizado por el proceso de planificación de la expansión, para la evaluación de ITs, es el VPN. Este método se desempeña adecuadamente si el proyecto se expone a una nula o baja incertidumbre de sus variables de estado, y no tiene ninguna opción de flexibilidad (opción de diferir, abandonar, etc.). La metodología de RO no se limita a determinar el momento óptimo para invertir, también cuantifica la flexibilidad necesaria para adaptar las inversiones a eventos inesperados, como la evolución de las variables inciertas a escenarios desfavorables.

En dicho contexto, este trabajo propone una metodología basada en [13], incorporando el análisis de las incertidumbres [14], que valora cada alternativa de inversión en términos del incremento (o decremento) del bienestar social resultante de la ejecución de la inversión. Así, los costos de producción del sistema eléctrico se determinan para cada hora durante el horizonte de inversión, a través de un flujo óptimo de potencia (OPF) para el caso base y los escenarios de post-inversión. La diferencia entre estos costos define el Bienestar Social Incremental (BSI).

En este sentido, se contempla un enfoque para la evaluación de las alternativas de inversión, donde la evolución de las variables aleatorias inciertas se modela a través de procesos estocásticos apropiados y se diseñan realizaciones factibles para las incertidumbres aleatorias. Por lo tanto, el modelo estocástico de la tasa de crecimiento de la demanda  $dR(t)$ , a lo largo de un intervalo  $dt$ , puede ser representado por un Movimiento Browniano generalizado de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dR(t) = \mu_{d,i} \cdot dt + \sigma_{d,i} \cdot dz \quad (6)$$

Donde  $\mu_{d,i}$  es la tasa de crecimiento de carga media estimada incondicional para el año  $t$ ,  $\sigma_{d,i}$  es la varianza incondicional estimada para este intervalo de tiempo y  $dz$  es el proceso de Wiener.

Las RO basan su valor en el hecho de que se establece un piso a las posibles pérdidas de los proyectos [15]. En este artículo, primeramente se realiza un Flujo de Fondo Descontado Estocástico (FFDE), con el fin de encontrar el valor esperado y la volatilidad del activo subyacente (BSI). Posteriormente, el enfoque de Programación Dinámica basada en el Valor Esperado (PDE) -presentado en [8]- es utilizado con el fin de añadir el valor de la flexibilidad para el valor de la cartera de inversiones en transmisión.

#### 3.1 FLUJO DE FONDO DESCONTADO ESTOCASTICO

Como se ha expuesto en [13], los Ahorros en Costos de Generación (SGC) para cada realización a lo largo del horizonte de inversión puede calcularse mediante la implementación de simulaciones de Monte Carlo. Por lo tanto, es definido el flujo de caja estocástico del proyecto, por la composición del BSI anual y los costos de inversión de la expansión. Por lo tanto, el valor presente del BSI acumulado se calcula sobre el horizonte de estudio basado en el ahorro de costos del sistema. Así, primeramente, los flujos de fondo del BSI que se originan por la ejecución del proyecto de expansión se descuentan del WACC (Costo Promedio Ponderado del Capital), de acuerdo con:

$$VP(BSI)_{s,w,t_n} = \sum_{t=t_n}^T \frac{SGC_{t,w}^s}{(1+WACC)^t} \quad (7)$$

$$VPN(BSI)_{s,w,t_n} = \sum_{t=t_n}^T \frac{SGC_{t,w}^s - I_{s,t}}{(1+WACC)^t} \quad (8)$$

$$EVPN(BSI)_{s,w,t_n} = \sum_{w=1}^W \frac{1}{W} VPN(BSI)_{s,w,t_n} \quad (9)$$

Donde  $SGC_{t,w}^s$  es el ahorro en costo de generación e  $I_{s,t}$  es el costo de inversión, las ecuaciones (7) y (8) son el  $VP$  y el  $VPN$  del  $BSI$  mediante la ejecución de la estrategia de inversión  $s$  en el año  $t_n$ , y  $T$  es el horizonte de inversión. Finalmente, la ecuación (9) define el valor esperado del  $VPN$  para  $W$  realizaciones de Monte Carlo. En cada caso, los sub-índices correspondientes al  $t$ -ésimo año,  $w$ -ésima realización de Monte Carlo.

### 3.2 PROGRAMACION DINAMICA BASADA EN VALOR ESPERADO

El valor de una inversión flexible se calcula hallando el tiempo óptimo de ejercicio de las opciones de flexibilidad. La programación dinámica es una herramienta adecuada para realizarla. Este enfoque podría ser visualizado como un árbol de decisión y la  $RO$  requiere una búsqueda del *timing* óptimo para invertir. En un tiempo dado  $t$ , el modelo estima el  $VPN$  de la inversión teniendo en cuenta la probabilidad de dos escenarios: invertir ahora o mantener la inversión hasta el próximo período. En aras de la claridad, como se ha expuesto en [8], el punto de partida del análisis es la evaluación de las inversiones en el  $ST$  con la opción de diferir. Suponiendo que la licencia del proyecto tiene  $T$  años de validez y el capital necesario para invertir en el año  $T$  es  $I(T)$ , el valor esperado del proyecto de inversión se considera como el activo subyacente,  $E[VP(BSI), T]$ . La tasa libre de riesgo se denota por  $r$ .

La política óptima de ejercicio de las opciones se deriva de la comparación del valor intrínseco de la opción de diferimiento,  $V^{ej}$ , con el valor de mantener viva la opción,  $V^{cont}$ . El problema se inicia desde el último año y procede recursivamente de atrás hacia adelante, hasta el primer año. En el último año  $T$ , el problema es modelado de la siguiente manera:

$$\text{Ejecutar, si } V(T) = E[VP(BSI, T)] > I(T)$$

$$\text{No ejecutar, si } V(T) = E[VP(BSI, T)] \leq I(T) \quad (10)$$

Por consiguiente, la política de decisión óptima en  $T$  es:

$$V^*(T) = \max[(E[VP(BSI, T)] - I(T)); 0] \quad (11)$$

Para todo el año  $0 < t < T$ , el valor de ejercer la opción de invertir en un tiempo dado es el  $VPN$  del proyecto de inversión si la inversión se realiza en el instante  $t$ , es decir:

$$V^{ej}(t) = E[VP(BSI, t)] - I(t) \quad (12)$$

Por otra parte, el valor de la continuación de la opción en el instante  $t$ -ésimo, es decir, el valor del proyecto, si la decisión es posponer la ejecución, está dada por:

$$V^{cont}(t) = \frac{V^*(t-1)}{(1+r)} \quad (13)$$

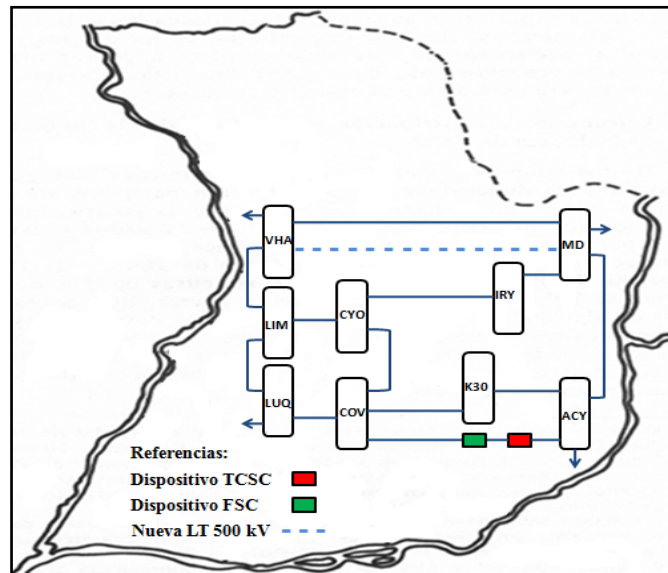
Donde  $V^{cont}(t)$  es el valor encontrado en condiciones óptimas durante los años  $t + 1, t + 2, \dots, T - 1, T$  descontados al año  $t$ . Por lo tanto, en cualquier año  $t$ , la política óptima de ejercicio se deriva del problema de optimización:

$$V^*(t) = \max[E[VP(BSI, t)] - I(t); \frac{V^*(t+1)}{(1+r)}] \quad (14)$$

La última relación de optimización extiende la regla clásica del VPN. La política de decisión extendida es: "En el año  $t$ , el tomador de decisiones no debe invertir en el proyecto de inversión (esperar al menos un año), a menos que el valor esperado del VPN de la inversión es mayor que el valor de continuación" [15]. Si la opción no se ejerce en el año  $t$ , el titular de la opción tendrá dos opciones para el próximo año: la opción de ejercicio o esperar una mejor oportunidad (diferir la inversión). Por lo tanto, el método proporciona el momento óptimo de la inversión y el valor de dicha ejecución óptima,  $V^*(0)$ .

#### 4. VALORACION DEL CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA. CASO DE ESTUDIO

Este trabajo analiza el Sistema Interconectado Nacional (SIN) del Paraguay como caso de estudio, tomando como año base el 2016. El sistema es replicado mediante un modelo de 94 barras en los niveles de tensión de 66 kV, 220 kV y 500 kV, respetando los niveles de  $\pm 10\%$  de la tensión nominal establecidos por la compañía eléctrica del Paraguay, ANDE. Los parámetros de las LTs, generadores y cargas fueron seleccionadas de la base de datos de dicha empresa eléctrica [16]. Además, la evolución de la demanda del sistema eléctrico se modela en base a la tasa de crecimiento estocástica, donde el componente de desplazamiento es igual a la media anual del crecimiento histórico de la demanda del Paraguay. Es considerado período de demanda máxima. La curva de duración de carga anual se mantiene constante (4 horas pico durante 60 días) en el horizonte de inversión. La Fig. 3 da una visión general de la estructura del modelo de red considerado.



**Figura 3: Estructura del modelo de red**

Por lo tanto, tres alternativas de inversión se evalúan; alternativa 1: una nueva LT 500 kV entre los nodos VHA y MD, lo que conduce a 240 MUSDD en costos de inversión aproximadamente; alternativa 2: un TCSC de 35 MVar conectado a la LT entre los nodos de COV y ACY, lo que lleva a 2,3 MUSDD en costos de inversión según la función de costos presentada en [17]; y alternativa 3: un FSC de 7.84 MVar en vez del

TCSC, instalado entre los mismos nodos, lo que lleva a 209.822 USD en costos de inversión según [12]. Por lo tanto, las estrategias de inversión mutuamente excluyentes son: invertir en dispositivos FACTS o invertir en Compensadores Serie Fijo. Una vez que ya se ha ejecutado cualquier alternativa, estará disponible en el año siguiente la opción de invertir en una nueva LT. En los escenarios de déficit de energía, el precio marginal se ha fijado en el valor del VOLL (Value of Lost Load), que ha sido asumido como 483 USD/MWh. Se considera como la madurez de todas las opciones de inversión 6 años y 20 años el horizonte de inversión. Se considera una tasa de inflación anual del 4% y una tasa de descuento del 10%.

Con el fin de determinar el costo de operación se hacen simulaciones de flujo óptimo de potencia (DC-OPF). El DC-OPF se calcula utilizando el software Matpower, que es un paquete de simulación para sistemas de potencia en MATLAB [18]. La diferencia de costos entre los dos escenarios define el activo subyacente que luego se evalúa. El criterio de parada de Monte Carlo se establece con un error máximo relativo del 1,5%, un intervalo de confianza del 95% y se calcula por el método de estimación secuencial. Por lo tanto, 2.000 simulaciones son necesarias para llevar a cabo y satisfacer el criterio de convergencia [19].

La principal contribución de este trabajo es cuantificar en términos económicos el control del flujo de potencia de los dispositivos FACTS, comparando el valor del ISW de la alternativa de inversión en FACTS con el valor de un proyecto de inversión en FSC.

#### 4.1 EVALUACION DE OPCIONES REALES

Las Tablas I y II exponen los valores de las opciones de ejecución de cada alternativa de inversión para cada año de vigencia de la opción de inversión. La valoración de la opción de diferimiento de la inversión cuantifica la flexibilidad según [20].

Tabla I: E[VPN(BSI)] de la alternativa 1 y la alternativa 2

| E[VPN(BSI)]<br>[MUSD] |        | FACTS  |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       |        | NO INV | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  | 2021  |
| LT                    | NO INV | 0      | 491.8 | 480.6 | 456.3 | 427.9 | 395.8 | 356.1 |
|                       | 2016   | 102    | 120.1 | 117.2 | 116   | 114.5 | 112.6 | 110.8 |
|                       | 2017   | 97.1   | 129.5 | 115.4 | 114.2 | 112.7 | 110.8 | 109   |
|                       | 2018   | 84.6   | 140.1 | 126   | 101.7 | 100.2 | 98.3  | 96.5  |
|                       | 2019   | 63.1   | 145.3 | 131.3 | 107.1 | 78.7  | 76.7  | 74.9  |
|                       | 2020   | 36.5   | 149   | 134.9 | 110.7 | 82.3  | 50.2  | 48.4  |
|                       | 2021   | 20.9   | 174.4 | 160.4 | 136.1 | 107.7 | 75.6  | 32.8  |

Los resultados muestran que la estrategia óptima de inversión consiste en ejercer la Alternativa 2 (FACTS) al año 2016 y el aplazamiento de la Alternativa 1(LT) más allá de su vencimiento. Con este ejemplo, es notable la relevante opción de diferimiento en el proceso de toma de decisiones. Aunque, en el año 2016 la estrategia invertir en ambas alternativas tiene VPNs positivos, la decisión óptima es muy diferente de la decisión que se produciría por la regla tradicional del VPN; si el VPN es positivo, ejecutar inmediatamente.



Tabla II: E[VPN(BSI)] de la alternativa 2 y la alternativa 3

| E[VPN(BSI)]<br>[MUSD] |        | FSC    |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       |        | NO INV | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  | 2021  |
| FACTS                 | NO INV | 0      | 506.2 | 493.3 | 467.4 | 437.9 | 404.9 | 360.9 |
|                       | 2016   | 963.7  | 383.6 | 399.5 | 419.7 | 449.6 | 492.8 | 536.6 |
|                       | 2017   | 884.9  | 379.5 | 364.1 | 384.2 | 414.1 | 457.3 | 501.1 |
|                       | 2018   | 836.4  | 377.2 | 361.7 | 335.8 | 365.7 | 408.9 | 452.6 |
|                       | 2019   | 769.8  | 370.1 | 354.5 | 328.6 | 299.1 | 342.3 | 386.1 |
|                       | 2020   | 685.6  | 362.1 | 346.5 | 320.6 | 291.1 | 258.1 | 301.9 |
|                       | 2021   | 612.7  | 376.9 | 361.4 | 335.5 | 306.1 | 273.1 | 229.1 |

Bajo las incertidumbres, el rendimiento de los FACTS es mejor que el de los FSCs. Sin embargo, a priori es mejor invertir en un FSC como la decisión de menor costo. Esto es consistente con la toma de decisión de inversión tradicional en un sistema de potencia real, donde hoy en día es todavía más frecuente expandir la red con dispositivos no controlados debido al alto costo de los controladores dinámicos de flujos de potencia, pero la estrategia óptima de inversión en relación con el valor de la flexibilidad, es invertir en FACTS. Dicha flexibilidad permite una mejor adaptación a probables escenarios adversos en el futuro. Se pudo observar que la flexibilidad operativa del FACTS origina un fuerte impacto en el beneficio social del mercado eléctrico, esto debido a que posee margen de control como para utilizar la red existente de una manera eficiente.

Para el caso de estudio, un problema detectado en el sistema eléctrico, está asociado con el manejo de la congestión de flujo de potencia, es decir, las perturbaciones conllevan a cambios significativos en la topología y distribución de flujos de potencia, principalmente en zonas de mayor carga, y en barras adyacentes. Bajo estas condiciones, los dispositivos FACTS con atributos de control de flujo de potencia son una buena alternativa para solucionar tales problemas.

Por lo tanto, los métodos de evaluación de inversiones convencionales pueden ser inapropiados cuando se evalúan las inversiones en transmisión, ya que la presencia de incertidumbres aumenta drásticamente el riesgo involucrado en las decisiones irreversibles de gran escala. Bajo estas condiciones, la flexibilidad de un proyecto de inversión considerando el despliegue de la información tiene un valor significativo en un ambiente incierto, y su cuantificación es relevante con el fin de tomar decisiones eficientes.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó un modelo basado en simulaciones estocásticas y RO capaz de replicar el comportamiento estocástico de la demanda y procesar esta información con el fin de ejecutar la opción estratégica de manera óptima y maximizar el beneficio social del sistema. Este modelo se utilizó para valorar el control del flujo de potencia de los dispositivos FACTS, y fue capaz de cuantificar la influencia de las incertidumbres en el rendimiento del dispositivo, así como la valoración de las opciones de flexibilidad que cada alternativa de inversión podría ofrecer para hacer frente al despliegue de la incertidumbre.

Se presentó una aplicación numérica de la metodología mencionada y fueron identificadas las conclusiones pertinentes para el problema de ITs. También se ha analizado el comportamiento del valor esperado de la compensación serie, así como el efecto de las opciones flexibles estratégicas. Se demostró que la regla de inversión tradicional del VPN puede conducir a decisiones sub-óptimas y que la evaluación de la flexibilidad para tratar las incertidumbres mediante la ejecución de opciones reales disponibles es una tarea clave. Por lo

tanto, este trabajo aclara acerca de la importancia de la contemplación cuidadosa de estos factores con el fin de llevar a cabo una gestión óptima de la opción estratégica.

Finalmente, se ha demostrado en el caso de estudio analizado, que la contabilización de las incertidumbres, así como la flexibilidad, mejora en relación con el control de los flujos de potencia a través de los dispositivos FACTS, y es lo suficiente como para justificar su costo de instalación.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Olafsson, "Making decisions under uncertainty - implications for high technology investments," *BT Technology Journal*, vol. 21, 2003, pp. 170-183.
- [2] T.A. Luehrman, "Strategy as a portfolio of real options," *Harvard Business Review*, pp. 76-99, 1998.
- [3] G. Shrestha and P. Fonseka, "Flexible transmission and network reinforcements planning considering congestion alleviation," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 153, 2006, pp. 591-598.
- [4] B.T. Ooi, G. Joos, F.D. Galiana, D. McGillis, and R. Marceau. FACTS controllers and the deregulated electric utility environment. In *Electrical and Computer Engineering. IEEE Canadian Conference on*, vol. 2, pp. 597-600, 1998.
- [5] F. Longstaff and E. Schwartz, "Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach," *Review of Financial Studies*, vol. 14, 2001, pp. 113-47.
- [6] A. Gamba, "Real Options Valuation: a Monte Carlo Approach," Working paper, University of Verona, pp. 1-49, 2003.
- [7] G. Blanco, M. Dávalos and F. Fernández, "Impact of FACTS Devices on the Risk Profile of Portfolio Investment in Transmission Network of the Paraguayan power system," in *XIII Symposium of Specialists in Electrical Operation and Expansion Planning*, 2014, p. 1-9.
- [8] G. Blanco, F. Olsina and F. Garcés, "Transmission Investments under Uncertainty: the Impact of Flexibility on Decision-Making," in *IEEE PES General Meeting*, 2012, San Diego, p. 1-10.
- [9] Paper argencon
- [10] S. G. Jalali, R. A. Hedin, M. Pereira, and K. Sadek, "A stability model for the advanced series compensator (ASC)," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, pp. 1128–1137, Apr. 1996.
- [11] C. A. Cañizares and Z. T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, pp. 158–165, Feb. 1999.
- [12] Paper valuing
- [13] G. Blanco, *Evaluación de portafolios de inversiones flexibles en el sistema de transmisión incluyendo dispositivos FACTS*, volumen 1, Ed. Fundación de la Universidad Nacional de San Juan, 2010.
- [14] D. Ullman. *Making Robust Decisions: Decision Management for Technical, Business, & Service Teams*. Trafford Publishing. 2006.
- A. Dixit and R Pindyck, *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, pp. 93-125, 1994.
- [15] Administración Nacional de Electricidad, "Plan Maestro de Generación y Transmisión (2012-2021)," Jul. 2011.
- [16] G. Blanco, F. Olsina, O. Ojeda, and F. Garcés, "Transmission expansion planning under uncertainty - The role of FACTS in providing strategic flexibility", in *IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, Bucharest, Romania, p. 1-8.
- [17] R. Zimmerman, C. Murillo-Sánchez and R. Thomas, "MATPOWER Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [18] G. Fisherman, *Monte Carlo: Concept, Algorithms and Applications*, vol. 1. New York: Springer 1996.
- [19] S. Olafsson, "Making Decision under uncertainty-implication for high technology investment", *BT Journal*, vol. 22, No. 2, 2003.