

Factibilidad de un Plan de Expansión de la Transmisión: Riesgo e Incentivo a la Inversión

Juan D. Molina, *Member, IEEE*, Hugh Rudnick, *Fellow, IEEE*, Javier Contreras, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Las metodologías de expansión se sostienen bajo principios de cooperación y bajo este principio se han propuesto alternativas para su desarrollo. Sin, embargo, los agentes participantes en la expansión de la transmisión son racionales y como tal maximizan su utilidad. Esto hace necesario evaluar mecanismos de acoplamiento entre conceptos económicos y técnicos con la finalidad de brindar soluciones claras y transparentes para el desarrollo del mercado eléctrico.

Se propone una metodología para la expansión de la transmisión, un juego, que consta de cuatro elementos principales: i) la generación de alternativas de planes de expansión mediante un algoritmo meta-heurístico (optimización ordinal multi-objetivo con búsqueda tabú y encadenamiento de trayectorias), ii) la valoración de proyectos con base en el diseño de contrato lineales, soluciones de negociación bilateral y el modelo de principal-agente, iii) el valor óptimo de un portafolio de inversión sujeto al valor en riesgo condicional y iv) la aceptabilidad y asignación de costo de los proyectos de expansión.

Los resultados muestran que determinar cuáles son las características de cada inversionista, inferir su nivel de esfuerzo y su capacidad para disminuir los costos permitirán asignar de forma eficiente los proyectos. Se concluye que las técnicas meta-heurísticas son una herramienta eficaz para resolver el problema combinatorial. La compatibilidad de incentivos de los agentes permitirá un proceso coordinado para ejecutar oportunamente la expansión. El mecanismo con base en un juego no-cooperativo define las reglas de compatibilidad de incentivos y revelación de información que mitigan la incertidumbre que caracteriza la expansión. A su vez, la cuantificación del riesgo determina el límite de participación de los inversionistas y se identifica los proyectos que podrán ejecutarse eficientemente.

I. PLAN DE EXPANSIÓN FACTIBLE

EN la actualidad, los criterios básicos a considerar en la planificación de la expansión de la transmisión consideran lo siguiente [1]: mejoramiento de la confiabilidad, incremento de la disponibilidad de suministro y el incremento de la competencia de los agentes del mercado. Además, de lo anterior se deben diseñar mecanismos con base en incentivos que maximicen el beneficio social y la representación de

escenarios más reales (representación de la generación, transmisión y demanda) que permitan obtener la inversión óptima del sistema de transmisión [2], la identificación de los riesgos más relevantes en la planeación de la transmisión y la incidencia de estos en la expansión del sistema [3].

A. Filosofía de expansión de la transmisión

En la transmisión, las metodologías de expansión se sostienen bajo principios de cooperación y bajo este principio se han propuesto alternativas para su desarrollo. En la literatura [4], se encuentran diversas formas de proponer el modelo económico bajo el cual se lleva a cabo la expansión. Tradicionalmente, se caracterizan los agentes según su función objetivo o interés en la expansión, la definición de estrategias y pagos, el tipo de modelo oligopólico y las etapas de negociación (repetición del juego) [5]. A su vez, se proponen diversos enfoques para plantear el juego de expansión de la transmisión [6], [7], [2], [8], [9], [10]. ¿Cuál es el juego de la transmisión?, esto sin lugar a duda dependerá de la metodología de planificación, quiénes toman las decisiones, un planificador centralizado o un coordinador responsable de articular las diferentes propuestas de expansión, y cómo estos pueden influir en el plan de expansión de la transmisión. Además, resolver el dilema respecto a que si la estructura del mercado refleja las inversiones de capacidad necesarias del sistema y el momento de éstas, es decir, si la expansión debe darse de forma proactiva [6]. Esto genera un problema de anticipación entre la expansión de líneas de transmisión y la inclusión de nueva generación. Este tipo de comportamiento trae una alta incertidumbre, porque si bien, desde el punto social es más eficiente, la anticipación acarrea un costo y riesgo respecto a si se construye o no una central de generación [9, 11].

B. Metodología

La metodología desarrolla un juego en el que interactúan diversos agentes, el planificador centralizado y/o regulador, inversionistas, generadores, consumidores y propietarios de las servidumbres. Se evalúan los planes de expansión considerando el costo óptimo que puede lograr un inversionista, su oferta esperada sujeta al número de competidores y el valor esperado del proyecto. Además, se considera el impacto del riesgo, el método de asignación de costo y aceptabilidad del proyecto para determinar el nivel de factibilidad de un proyecto o plan de expansión.

Una vez se identifican los planes de expansión factibles técnicamente, se inicia con la evaluación de los planes o proyectos de expansión mediante el modelo del juego de la transmisión. El modelo del juego de la transmisión consiste en obtener el valor óptimo de un proyecto $j \in J$.

This work was supported in part by Conicyt-Programa en Energías 2010, Pontificia Universidad Católica de Chile, Fondecyt, Mecsup (2), Transelec.

J. D. Molina is at Systep Ingeniería y Diseños S.A., Don Carlos #2939, Of. 1007, Las Condes, Santiago, Chile (email: jdmolinac@ieee.org).

H. Rudnick is with the Electrical Engineering Department, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile (email hrudnick@ing.puc.cl).

J. Contreras is with E.T.S. de Ingenieros Industriales, University of Castilla – La Mancha, Campus Universitario s/n, 13071 Ciudad Real, Spain (email: Javier.Contreras@uclm.es).

En este se considera costos ocultos y costos de negociación por servidumbre para obtener una valoración más acertada y evitar retrasos en la ejecución del proyecto.

El modelo propuesto consiste en 4 etapas: 1) determinar el costo óptimo del proyecto, 2) incentivar la inversión de proyectos de expansión, 3) determinar el portafolio óptimo de inversión y 4) establecer el grado de aceptación de un plan de expansión.

La primera, determina el costo o valor óptimo del costo que realiza cada inversionista. Este se compone del valor del activo y estudios técnicos y ambientales (valor fijo), la valoración de la negociación esperada por la servidumbre (función del tipo de propietario del terreno) y la valoración del esfuerzo (función del tipo de inversionista).

En la segunda etapa, se diseña un contrato tipo lineal y el modelo principal-agente para incentivar la inversión. Se determina el valor esperado (referencia) de cada proyecto y del plan o planes de expansión en estudio. Se considera una subasta de primer precio (licitación de menor VPN, total o anualidad) que depende de los incentivos y los riesgos del proyecto. La valoración óptima es función del diseño del contrato (riesgo moral, el riesgo de los costos y el número de oferentes), la competencia para asignarse un proyecto y el costo de negociación de la servidumbre.

La tercera etapa considera la valoración del riesgo condicional para determinar el portafolio óptimo de inversión de los agentes interesados en los proyectos de expansión para identificar el tipo de ofertas y la participación esperada de los agentes en la asignación del plan de expansión.

La última etapa consideran dos criterios: la metodología de asignación de costo y la probabilidad de aceptación de un proyecto para establecer el impacto de actitudes de rechazo hacia los proyectos del plan expansión definido como óptimo (proyectos no deseados “*Not In My BackYard – NIMBY*”). Se utiliza una metodología híbrida entre el método GGDF [12] y un proceso de negociación (soluciones de negociación de Nash y Kalai-Smorodinsky – [13]) para re-asignar la proporción del costo considerando la integración de energía renovables.

En este artículo, se considera un modelo de preferencias de elección discreta para realizar sensibilidades acerca de la aceptabilidad de un proyecto. Se construye un modelo de elección discreta Logit-mixto para determinar la percepción acerca de la aceptación de un proyecto considerando las preferencias y utilidades de los agentes [14, 15]. Se realiza una simulación Montecarlo para emular la percepción o preferencias de los usuarios respecto a los siguientes atributos: el incremento del costo por la expansión, el impacto en las emisiones del sistema, el impacto de la diversidad de energía, el diseño de mecanismos de compensación, la construcción del proyecto, el grado de cooperación para ejecutar la expansión (función del uso del suelo e individuos afectados), y el grado de aceptación de la regla de asignación de costo. Básicamente, se emula un proceso de encuesta para identificar las preferencias de los individuos, sean estos generadores, transportadores, consumidores y la sociedad en general.

C. Formulación matemática

El modelo determina el valor esperado del plan de expansión compuesto de los proyectos $j \in J$ y los inversionistas $n \in N$ sujeto a la valoración del riesgo y el grado de aceptación de estos. La modelación de costo y oferta óptima considera que el inversionista hace una oferta que maximiza su ingreso y el propietario de la servidumbre maximiza su utilidad. El valor óptimo del proyecto, V_j^w , depende del factor de reconocimiento de costo α_j y el número de participantes en la licitación. Se asume un contrato tipo incentivo, tal que, el valor óptimo del proyecto estará determinado por la Ec. (1). El valor V_j^n es el pago esperado del principal sujeto a la oferta b_j^n con en el menor valor esperado del costo del proyecto j .

$$V_j^n = \mathbb{E}[(1 - \alpha_j) \cdot b_j^n + \alpha_j \cdot c_j^{n*}] \quad (1)$$

Ahora, asumiendo que la distribución de ofertas $B(v)$ es uniforme, el valor mínimo de las ofertas $B(v) = 0$ y la distribución del sobre costo $F(\varphi_j^n)$ es normal $[0, \sigma^2]$ se establece que la oferta óptima $B(v)$ se obtiene mediante la Ec. (2) [16].

$$B(v) = v \cdot (n - 1)/n \quad (2)$$

Donde v representa la valoración del proyecto. De esta forma, si consideramos que la valoración de un proyecto es el costo óptimo, c_j^{n*} , que determina cada agente. El valor de un proyecto se determina mediante la Ec. (3).

$$V_{j,s} = c_j^{n*} \cdot (n_j + \alpha_j - 1)/n_j \quad (3)$$

La Ec. 4 establece el valor esperado del plan de expansión [10].

$$\max_{\alpha_j} \sum_{j=1}^J \mathbb{E}[V_j^w] = \sum_{j=1}^J \mathbb{E} \left[b_j^w \cdot \left[(1 - \alpha_j) + \frac{\alpha_j \cdot N}{N - 1} \right] \right]; \forall_j \quad (4)$$

s.a.

$$\min_{c_j^{n*}} b_j^n = \frac{N - 1}{N} \cdot \mathbb{E} \left[\text{opt}_{x_j^{n,Row}, e_j^n} c_j^{n*} \right]; \forall_{n,j} \quad (5)$$

$$c_j^{n*} = c_j^n + x_j^{n,Row} + \varphi_j^n - e_j^n; \forall_{n,j} \quad (6)$$

$$x_j^{n,Row}(S, d_M) \in \max_{x \in S} U_{BS}; \forall_{n,j} \quad (7)$$

$$e_j^n = \frac{\lambda_j^n}{\gamma_j^n} \cdot \frac{(\lambda_j^n)^2}{(\lambda_j^n)^2 + \gamma_j^n \cdot \rho_j^n \cdot (\sigma_j^n)^2}; \forall_{n,j} \quad (8)$$

$$\mathbb{E}[I_j^n] = \kappa_j^n + \xi_j^n \cdot \pi_j^n - \frac{\gamma_j^n \cdot (e_j^n)^2}{2} - \frac{\gamma_j^n \cdot \rho_j^n \cdot (e_j^n)^2}{2}; \forall_{n,j} \quad (9)$$

$$\kappa_j^n = z_j^n - \frac{(\lambda_j^n)^4}{\gamma_j^n \cdot [(\lambda_j^n)^2 + \gamma_j^n \cdot \rho_j^n \cdot (\sigma_j^n)^2]} \cdot \left[0.5 - \frac{(\lambda_j^n)^2}{[(\lambda_j^n)^2 + \gamma_j^n \cdot \rho_j^n \cdot (\sigma_j^n)^2]} \right]; \forall_{n,j} \quad (10)$$

$$\xi_j^n = \frac{(\lambda_j^n)^2}{(\lambda_j^n)^2 + \gamma_j^n \cdot \rho_j^n \cdot (\sigma_j^n)^2}; \forall_{n,j} \quad (11)$$

Nótese que b_j^w es la oferta de menor valor del vector de ofertas, b_j^n (el planificador centralizado solo conoce las ofertas). Las ofertas b_j^n dependen del costo óptimo esperado, c_j^{n*} , y el número de participantes en la licitación Ec. (5). El costo óptimo esperado, c_j^{n*} , Ec. (6), se determina con base en el valor de referencia del proyecto c_j^n , el costo de servidumbre $x_j^{n,RoW}$ Ec. (7), el costo impredecible φ_j^n (es una variable aleatoria con un valor esperado de cero) y el valor del esfuerzo, e_j^n Ec. (8). Se consideran las 10 soluciones de negociación [13] para determinar $x_j^{n,RoW}$ Ec. (7). El punto desacuerdo, d_M , lo determina el planificador centralizado o un tercero, el cual define un valor mandatorio. e_j^n representa el costo monetario que refleja la capacidad del agente para reducir su costo Ec. (8). Ahora, considerando la restricción de racionalidad individual, el agente participa en una licitación si el ingreso esperado, $\mathbb{E}[I_j^n]$ Ec. (9), es tal que $\mathbb{E}[I_j^n] \geq z_j^n$, donde z_j^n es el ingreso mínimo o capital para reinvertir en el proyecto, y la restricción de compatibilidad de incentivos hace que el agente elija el esfuerzo e_j^n que maximiza I_j^n ($d\mathbb{E}[I_j^n]/d e_j^n = 0$), de tal forma que se satisface las restricciones Ec. (10) y (11).

Nótese que el valor máximo esperado, V_j^w , de un proyecto j dependerá de la política de incentivos que determina el factor de reconocimiento de costo α_j . Este incentivo incrementa el número de participantes en la licitación lo que se reflejará en ofertas competitivas, b_j^n . A su vez, desde el punto de vista de los costos y considerando que la transmisión es un monopolio regulado, el modelo de principal-agente infiere el tipo de agente n (esfuerzo e_j^n que maximiza la utilidad, U_j^n , del agente n) que desarrolla el proyecto j , es decir, sus costos reales en la ejecución, $c_j^n + \varphi_j^n$, y el costo de adquisición de los derechos de servidumbre, $x_j^{n,RoW}$. Esto da una señal acerca si el valor de la oferta es factible desde el punto de vista de su ejecución, tal que, se limita el riesgo en la ejecución de un proyecto, aún si existen multas para este fin (el principal objetivo del planificador central es ejecutar eficientemente el plan óptimo de expansión en costo y tiempo).

Adicionalmente, al considerar la valoración del riesgo que realiza cada inversionista para determinar el portafolio óptimo de inversión o los proyectos en los cuales presentará una oferta. Estos evalúan los costos anuales de los proyectos. Los costos se componen de los gastos de administración, operación, mantenimiento y pago de compensaciones o multas. Inicialmente, la anualidad del costo se determinada mediante la Ec. (12).

$$aC_{j,s} = [i \cdot (1 - (1 + r)^{-l})^{-1}] \cdot c_j^{n*} \cdot [1 + \lambda_{j,s}] \quad (12)$$

Donde r es la tasa de descuento y l es la vida útil remunerada de los activos. $\lambda_{j,s}$ representa el costo de operación, mantenimiento y administración, *COMA*, como porcentaje del c_j^{n*} . De acuerdo con la Ec. (1) la oferta V_j^w representa el valor mínimo que permitirá asignarse la construcción del proyecto. El valor esperado de su oferta es el ingreso regulado del proyecto durante toda su vida útil reconocida y como tal debe considerar el impacto de los riesgos. En nuestro caso, el beneficio del ingreso anual dependerá de dos riesgos: sobrecosto del $\lambda_{j,s}$ y las multas, k_j , por retrasos, $\delta_{j,s}$, en la

ejecución y operación del proyecto. Con base en lo anterior consideramos que la función de ingresos anuales está determinada por la Ec. (13).

$$aV_{j,s} = [i \cdot (1 - (1 + r)^{-l})^{-1}] \cdot V_{j,s} \cdot [1 + (\lambda_{j,R} - \lambda_{j,s}) - k_j \cdot \delta_{j,s}] \quad (13)$$

Se asume que $(\lambda_{j,R} - \lambda_{j,s})$ se aplica para $\lambda_{j,s} > \lambda_{j,R}$, dado que $\lambda_{j,s} < \lambda_{j,R}$ no implica una reducción en los ingresos sino una mayor rentabilidad, es decir, para valores inferiores de $\lambda_{j,s}$ se iguala a $\lambda_{j,R}$ ($\lambda_{j,s} = \lambda_{j,R}$)

Finalmente, para establecer el nivel de aceptabilidad de los proyectos que hacen parte del plan de expansión, se implementa un modelo Logit-mixto. Este establece una probabilidad que se deriva de comportamientos que maximizan la utilidad individual. En nuestro caso, un tomador de decisión que hace una elección respecto a aceptar o no un proyecto j con base en la utilidad de un individuo m por el proyecto j mediante la Ec. (14):

$$U_{m,j} = \beta_m \cdot y_{m,j} + \varepsilon_{m,j} \quad (14)$$

donde $x_{m,j}$ son las variables observables de un proyecto j y la elección de m . β_m es el vector de coeficientes de cada individuo m . Los coeficientes representan las preferencias de cada individuo, y $\varepsilon_{m,j}$ es una variable aleatoria independiente e idénticamente distribuida mediante una distribución de valores extremos. Los coeficientes varían en función de los individuos m y la función de densidad de probabilidad $f(\beta_m)$. El tomador de decisión conoce sus parámetros β_m y $\varepsilon_{m,j}$ para el proyecto j y acepta el proyecto j si y sólo $U_{m,i} > U_{m,j}$, tal que, la probabilidad condicional de β_m es:

$$L_{m,j}(\beta_m) = \frac{e^{\beta_m \cdot y_{m,j}}}{\sum_j e^{\beta_m \cdot y_{m,j}}} \quad (15)$$

De tal forma que la función de utilidad aleatoria se puede aproximar mediante un modelo logit-mixto con cierta distribución y sus parámetros asociados [14]. Las probabilidades se aproximan mediante el método de simulación para cualquier valor de θ [14]. Por tanto, la probabilidad simulada es:

$$\check{P}_{m,j} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R L_{m,j}(\beta_m^r) \quad (16)$$

donde R es el número de simulaciones y $\check{P}_{m,j}$ es el estimador insesgado de $P_{m,j}$. La probabilidad de $P_{m,j}$ brinda una percepción acerca de la aceptación y nivel de aprobación de un proyecto.

II. ESTUDIO DE CASO

El sistema de 24 nodos IEEE 24-RTS considera una red de transmisión de 34 líneas existentes y 7 corredores adicionales a considerar en el proceso de optimización. Se asume que todas las líneas por corredor son idénticas y el máximo de

líneas por corredor es de 3. El algoritmo de generación de planes de expansión se implementó en MATLAB® 7.3. Se utilizó un procesador Intel® Core™ 2 Duo T5250 @ 1.50Hz con 2 GB de RAM. Los datos del sistema IEEE se encuentran en [17]. Para el cálculo del flujo de potencia óptimo se utilizó la herramienta Matpower 4.0b3 [18].

Para la generación de planes de expansión se utilizó la metodología multi-objetivo con base en los criterios de optimización ordinal y búsqueda tabú con encadenamiento de trayectorias. En la Tabla I se describen 4 planes de expansión posibles. El plan 1, se denomina “status quo” y considera un costo de falla de \$2 USD/kWh. El plan 2: adaptado, considera un incremento del 100% del costo de falla. Los planes status quo y adaptado utilizan una estrategia de búsqueda bi-objetivo, el costo de operación y la anualidad de inversión. El plan 3: diverso, considera el costo de falla del plan status quo y utiliza una estrategia de búsqueda multi-objetivo: costo del sistema (operación y anualidad de inversión), emisiones y la diversidad en la matriz de generación de energía eléctrica. Por último, el plan 4: sustentable, considera el costo de falla del plan adaptado y la búsqueda multi-objetivo del plan diverso.

TABLA I
PLANES DE EXPANSIÓN: SISTEMA 24 RTS-IEEE

1.Status quo	2.Adaptado	3.Diverso	4.Sustentable
	6-7		1-8
6-10	14-23	14-23	3-9
	20-23		5-10
			16-17

Ahora, para evaluar la metodología descrita se definieron 5 tipos de oferentes/inversionistas. El primer tipo, se denomina no deseado y el último tipo, oferente 5, un tipo deseado. De acuerdo a este supuesto se establece para cada oferente su factor de negociación ($0 < \delta < 1$), su grado de aversión al riesgo ($0 < \rho < 1$), el coeficiente del nivel de esfuerzo ($0 < \lambda < 1$), la varianza de la valoración del proyecto (σ^2), el ingreso mínimo z (considerando que el negocio de la transmisión es un monopolio regulado las ganancias a reinvertir en un proyecto son cero), el coeficiente de costo del esfuerzo del oferente ($\epsilon > 0$), el presupuesto histórico de servidumbre (% histórico respecto a la valoración referencial del proyecto) y el presupuesto del activo (% histórico respecto a la valoración referencial del proyecto) (Tabla II). Se asume que el grado de negociación de cada propietario es función del grado de valoración que realiza sobre su terreno, es decir, entre más valora su terreno mayor será su factor de negociación. Se asume que la valoración del oferente está definida por una distribución uniforme entre el mínimo y la media del valor del terreno. De igual forma, se asume una distribución entre la media del valor del terreno y la valoración máxima para el propietario. El valor referencial de cada proyecto (activo) se obtuvo de [17]. El rango en el cuál oscila la valoración es de [0.9 – 1.1]. La valoración del terreno corresponde a una distribución uniforme entre \$7,500 y \$45,000.

La extensión de la servidumbre, en hectáreas, es función de la longitud del proyecto. Se asume que el número de propietarios de un proyecto es en promedio de 3 por km de longitud de la línea.

TABLA II
PARÁMETROS DE LOS INVERSIONISTAS

Inversionista	δ	ρ	λ	σ^2	ϵ	S_{ref}	A_{ref}
n_1	0.9	1.0	0.8	0.05	2.0	0.3	0.9
n_2	0.7	0.8	0.8	0.04	1.6	0.25	0.88
n_3	0.5	0.7	0.9	0.03	1.4	0.2	0.89
n_4	0.4	0.6	0.92	0.02	1.2	0.18	0.86
n_5	0.3	0.5	0.95	0.01	1.0	0.15	0.85

En la Tabla III, se presenta el valor de oferta que se considera óptima para cada inversionista. Se destaca que la oferta más económica no siempre es la establecida por el inversionista más deseado. Esto se debe a la estructura de costo y nivel de negociación para determinar el valor de la servidumbre.

TABLA III
VALOR DE OFERTA DE UN PLAN DE EXPANSIÓN

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
1	1	2.38	2.98	2.73	2.72	2.68	2.69
	1	7.57	9.35	8.84	8.68	8.44	8.50
2	2	11.08	13.40	12.49	12.16	11.82	11.93
	3	3.86	4.53	4.01	3.97	3.95	3.87
3	1	11.08	13.48	12.35	12.11	11.82	11.87
	1	5.29	6.60	6.12	6.02	5.91	5.95
4	2	4.69	5.85	5.34	5.34	5.23	5.30
	3	3.48	4.22	4.04	3.94	3.93	3.92
	4	4.63	5.40	4.84	4.80	4.62	4.69

Ahora, considerando que el plan status quo puede evolucionar a un plan adaptado (Tabla I), se obtiene que el costo del plan de expansión es de USD 24.13. Los proyectos 1 y 2 serían asignados al inversionista 4 y el proyecto 3 al inversionista 5 (Tabla IV).

TABLA IV
VALOR PLAN ADAPTADO

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
2	1	7.57	9.35	8.84	8.68	8.44	8.50
	2	11.08	13.40	12.49	12.16	11.82	11.93
	3	3.86	4.53	4.01	3.97	3.95	3.87

Un punto a analizar es que si bien este plan es más robusto, al considerar el riesgo, la participación de los inversionistas se restringe. Esto significa que una oferta óptima esperada podría ser reemplazada por otra sub-óptima. Por ejemplo, el inversionista 4 no participa en el proyecto 1 y como tal el nuevo valor esperado de la oferta es la determinada por el inversionista 5 con un valor de USD M\$ 8.50 (Tabla V).

TABLA V
IMPACTO DEL RIESGO EN PLAN DIVERSO

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
2	1	7.57	9.35	8.84	8.68	0.00	8.50
	2	11.08	0.00	0.00	0.00	11.82	0.00
	3	3.86	4.53	4.01	0.00	3.95	3.87

Esto muestra que un planificador centralizado debe introducir mecanismos e incentivos para mitigar los riesgos a los que se ve enfrentado un inversionista. Por ejemplo, si consideramos que la oferta por un proyecto no incluye el costo de la servidumbre, $x_j^{n,Row}$ Ec. (7), en el plan de

expansión diverso se obtiene que el valor de menor valor esperado está determinado por el inversionista 5, el inversionista deseado. Lo que significa pasar de USD M\$ 11.82 a USD M\$ 8.91. Este tipo de incentivo hace que un plan denominado riesgoso pueda evolucionar a un plan del tipo atractivo. En la Tabla VI se describe la oferta que cada inversionista realiza en un plan diverso bajo un enfoque atractivo.

TABLA VI
VALOR OFERTA PLAN DIVERSO SIN COSTO DE SERVIDUMBRE

Plan	j	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
con $x_j^{n,Row}$	1	13.48	12.35	12.11	11.82	11.87
sin $x_j^{n,Row}$	1	11.37	9.86	9.42	8.99	8.91

Ahora, considerando la misma lógica para el caso del plan adaptado, se obtiene que el valor de oferta esperado en cada proyecto disminuya. Esto conlleva a que el plan de inversión de un portafolio óptimo lo puede llevar a cabo el inversionista deseado y sería factible pasar de un plan riesgoso a un plan atractivo (Tabla VII).

TABLA VII
VALOR OFERTA PLAN ADAPTADO SIN COSTO DE SERVIDUMBRE

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
1	1	7.769	6.7338	6.438	6.145	6.089	1
2	2	11.37	9.8561	9.423	8.994	8.912	2
3	3	3.961	3.4336	3.283	3.133	3.105	3

En esta etapa del proceso, se establece que el plan óptimo estaría determinado por un plan adaptado-atractivo. Sin embargo, un punto a resaltar es el nivel de aceptación que posee dicho plan. En nuestro caso, se ha considerado que existen 3 zonas. Cada una refleja el nivel de aceptación o percepción de riesgo para la construcción de un proyecto. Por ejemplo, en la Fig. 2 se ilustra el área de las zonas consideradas, siendo la zona B una zona muy compleja, la zona A medianamente compleja y la zona C, una zona indiferente.

Con base en lo anterior podemos establecer la percepción de aceptación de los individuos afectados o sociedad en general respecto a un proyecto, Ec. (16). En nuestro caso, se asume que la percepción se obtiene de tres tipos de agentes: la demanda (D), los generadores (G) y la sociedad (S). En la Tabla VIII se muestra el porcentaje de aceptación para cada uno los agentes considerados y el plan de expansión.

TABLA VIII
PERCEPCIÓN DE ACEPTACIÓN DE UN PLAN DE EXPANSIÓN

Plan	j	D	G	S
1	1	91.1%	68.5%	53.6%
	1	92.4%	63.2%	50.6%
	2	93.0%	63.5%	45.3%
3	3	92.7%	71.6%	48.1%
	1	92.5%	65.7%	44.7%
4	1	92.2%	65.8%	52.1%
	2	91.2%	67.8%	53.6%
	3	92.5%	63.5%	52.2%
	4	91.8%	66.7%	51.9%

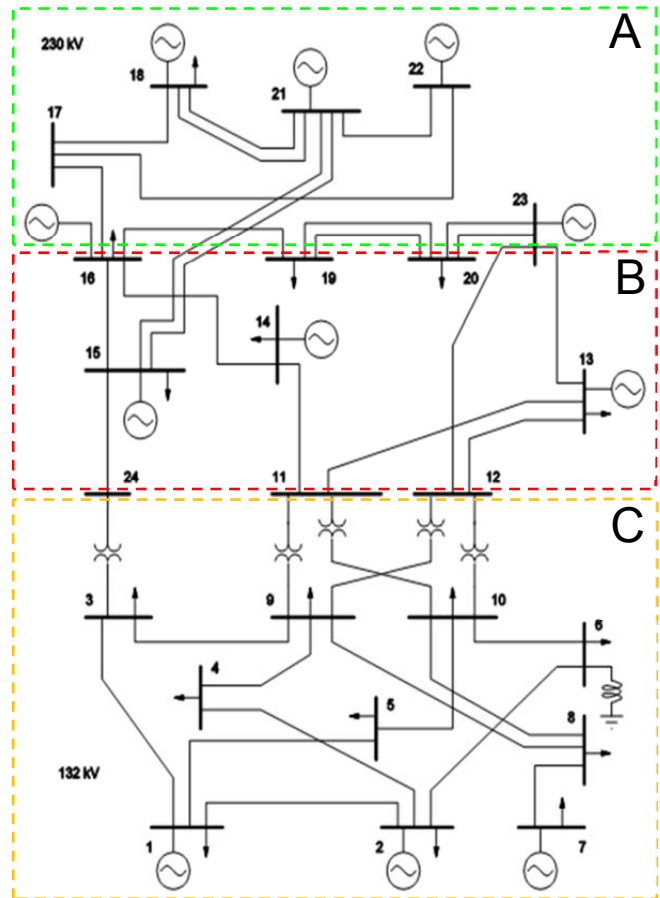


Fig. 2. Sistema 24 RTS-IEEE.

Se muestra como el plan 2: adaptado, presenta los porcentajes más bajos de aceptación, esto se debe a que el plan de expansión incluye proyectos de la zona B. Esto afecta la aceptabilidad del plan adaptado. De esta manera, si consideramos que el plan diverso 3 tiene la característica de aumentar la diversidad de la red y una menor cantidad de líneas a expandir. Este se enfrentará a un escenario de menor adversidad que el plan adaptado 2. Sin embargo, no presenta las ventajas del plan adaptado. Esto nos lleva a considerar el plan sustentable. Un punto a resaltar, es que el plan sustentable presenta mejores valores de aceptación, por ejemplo, si se considerará un sistema de votación con una regla de 50%+1 para aprobar un proyecto, estos serían aprobados

En la Tabla IX se muestra el valor de las ofertas para un plan sustentable que se considera atractivo, sin costo de servidumbre, y aceptable.

TABLA IX
VALOR OFERTA PLAN SUSTENTABLE-ACEPTABLE

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
4	1	5.429	4.7057	4.499	4.294	4.255	5.429
	2	4.813	4.1719	3.989	3.807	3.772	4.813
	3	3.571	3.0956	2.96	2.825	2.799	3.571
	4	4.752	4.1186	3.938	3.758	3.724	4.752

Ahora, considerando las Ecns. (1) y (4), se define un mecanismo de reconocimiento de costo, α_j , para incentivar la participación y ejecución eficiente de un proyecto (inversionista deseado). Por ejemplo, si consideramos un factor $\alpha_j = 0.5$ y la Ec. (4) se obtiene un valor adicional de aproximadamente del 12% (Tabla X).

TABLA X
VALOR OFERTA CON FACTOR DE RECONOCIMIENTO DE COSTO

Plan	j	V_{ref}	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
4	1	5.359	4.998	4.894	4.792	4.773	5.359
	2	4.752	4.431	4.339	4.249	4.231	4.752
	3	3.526	3.288	3.22	3.152	3.14	3.526
	4	4.691	4.374	4.284	4.194	4.177	4.691

La metodología de búsqueda de un plan factible determina que el costo de los planes adaptado, diverso y sustentable son de USD M\$ 18.106, 8.912 y 16.32, respectivamente. Si bien el plan de menor valor es el diverso, el plan sustentable incluye los requerimientos del plan adaptado y diverso, lo que conlleva a un plan más factible para su ejecución. Por tanto, de acuerdo a los planes de expansión definidos en la Tabla I podemos obtener la clasificación descrita en la Tabla XI.

TABLA XI
VALOR ESPERADO DE UN PLAN DE EXPANSIÓN POR TIPO

Plan	Riesgoso	Atractivo	Aceptable	Factible
Status quo	26.81			
Adaptado	24.13	18.11	6.09	
Diverso	11.82	8.91	0.0	
Sustentable	19.68	14.55	14.55	16.32

En la Tabla XI se muestra que un plan Adaptado-Aceptable toma el valor de MUS \$6.09. Esto se debe a que dos proyectos no podrán ejecutarse de manera eficiente y oportuna (nivel de aceptabilidad descrito en la Tabla XIII). Caso similar ocurre en el plan Diverso-Aceptable. El valor de cero o menor respecto a un plan riesgoso implica que los proyectos no podrán ejecutarse con el valor esperado establecido. Ahora, cabe analizar si el sobre costo de lograr la aceptación y el incentivo de participación de los inversionistas del plan Adaptado-Aceptable es menor igual a MUS \$10.23, tal que, sea a lo máximo igual al valor del plan Sustentable-Factible. De hecho se observa que el plan Adaptado-Atractivo es MUS \$1.79 más costoso que el plan Sustentable-Factible.

III. CONCLUSIONES

El modelo de planificación implementado articula distintos enfoques de optimización para identificar soluciones viables, planes de expansión de la transmisión, bajo lineamientos y visiones de la planificación energética.

El modelo proporciona un marco para incentivar y limitar los problemas de sobre-costo en la ejecución y negociación de servidumbre de los proyectos de transmisión. La metodología propuesta proporciona señales económicas para fomentar la inversión y ejecutar eficientemente los planes de expansión. Además, se identifican los proyectos que podrían presentar

una oferta no óptima, dado que los inversionistas solo elijen aquellos que maximicen su beneficio.

La viabilidad de un plan de expansión no sólo está determinada por una solución socialmente óptima (aspectos técnicos, el desarrollo económico y sostenible, entre otros), sino también, por los mecanismos necesarios para incentivar y asignar de manera eficiente la ejecución del plan de expansión, tanto en su valor como en el tipo de inversionista.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Molina and H. Rudnick, "Transmission of Electric Energy: a Bibliographic Review," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 8, pp. 245-258, 2010.
- [2] J. Contreras, G. Gross, J. M. Arroyo, and J. I. Munoz, "An incentive-based mechanism for transmission asset investment," *Decision Support Systems*, vol. 47, pp. 22-31, 2009.
- [3] Y. Li, J. D. McCalley, and S. R., "Risk-Based Transmission Expansion," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS '08. Proceedings of the 10th International Conference on*, Puerto Rico, USA., 2008, p. 8.
- [4] J. D. Molina and H. Rudnick, "Transmission expansion investment: Cooperative or non-cooperative game?," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-7.
- [5] F. Vega-Redondo, *Economics and the theory of games* Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [6] E. E. Sauma and S. S. Oren, "Proactive planning and valuation of transmission investments in restructured electricity markets," *Journal of Regulatory Economics*, vol. 30, pp. 261-290, Nov 2006.
- [7] R. Serrano, J. Zolezzi, H. Rudnick, and J. C. Araneda, "Private planning of transmission expansion through cooperative games," *POWERTEC IEEE conference*, Lausanne, Switzerland, pp. 903-908. 1-5 Jul, 2007.
- [8] M. R. Hesamzadeh, N. Hosseinzadeh, and P. J. Wolfs, "A leader-followers model of transmission augmentation for considering strategic behaviours of generating companies in energy markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, pp. 358-367, 2010.
- [9] V. Rious, J.-M. Glachant, and P. Dessante. (2010), *Transmission Network Investment as an Anticipation Problem*. RSCAS Working Papers 4(Jan). Available: <http://ideas.repec.org/p/rsc/rsceui/2010-04.html>
- [10] J. D. Molina, J. Contreras, and H. Rudnick, "A principal-agent approach to transmission expansion - part II: case studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28 no. 1, pp 264-271, Feb 2013.
- [11] E. Sauma, F. Traub, and J. Vera. (2010, May, 2010.). *Effect of Delays in the Connection-to-the-Grid Time of New Generation Power Plants over Transmission Planning*. Jun. Available: http://www.gsb.stanford.edu/facseminars/conferences/orpiconf/documents/Sauma_Enzoetal.pdf
- [12] H. Rudnick, R. Palma, and J. Fernandez, "Marginal Pricing and Supplement Cost Allocation in Transmission Open Access," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 1125-1132, May 1995.
- [13] J. D. Molina, J. Contreras, and H. Rudnick, "A principal-agent approach to transmission expansion - part I: regulatory framework", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28 no. 1, pp 256-263, Feb 2013.
- [14] K. Train, *Discrete choice methods with simulation*: Cambridge University Press, 2003.
- [15] J. D. Ortúzar and L. G. Willumsen, *Modelling Transport*: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] R. P. McAfee and J. McMillan, "Auctions and Bidding," *Journal of Economic Literature*, vol. 25, pp. 699-738, 1987.
- [17] L. P. Garces, A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, and R. Romero, "A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1513-1522, 2009.
- [18] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. 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.