



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

Optimización Multi-objetivo de la Expansión de Sistemas de Transmisión basado en Políticas Eficientes de Manejo de Demanda

Fernando Agüero, José Barquinero, Gerardo Blanco y Diego Pinto
GISE (Grupo de Investigación de Sistemas Energéticos)
Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción
Paraguay

RESUMEN

El objetivo principal de los diversos Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) es atender la demanda con adecuados niveles de confiabilidad incurriendo en el menor costo social posible. El proceso para determinar las acciones y/o inversiones necesarias para que el sistema cumpla con su objetivo principal es llamado de planeamiento de SEP. El planeamiento de los SEP envuelve la planificación de la operación y de la expansión de dichos sistemas. Considerando un continuo crecimiento de la demanda, existe un umbral para este crecimiento a partir del cual la infraestructura existente ya no es capaz de abastecerla adecuadamente. Bajo estas condiciones, existe la necesidad de proceder al planeamiento de la expansión, incluyéndose en este contexto la construcción de nuevas unidades generadoras y líneas de transmisión con toda la infraestructura necesaria.

Los SEP deben ser diseñados para operar de tal forma que el suministro de energía eléctrica sea garantizado en todo momento, es decir, debe ser capaz de generar, transportar y distribuir tanta potencia como sea requerida para abastecer la demanda en su totalidad en un instante dado. Sin embargo, la demanda varía temporal y geográficamente, convirtiendo a todo SEP en un sistema dinámico. Dentro de los SEP el Sistema de Transmisión (ST) es uno de los componentes principales debido a que no solo proporcionan un vínculo entre generación y distribución, sino también un entorno no discriminatorio y confiable para los oferentes y demandantes del mercado eléctrico. La planificación de la expansión de ST involucra determinar cuánto, dónde, y cuando se deben ser instalados nuevos equipos de transmisión para abastecer los crecimientos de demanda en la forma más económica, y bajo restricciones técnicas, financieras y de confiabilidad.

En este trabajo se presenta un modelo AC dinámico para obtener un plan de expansión de ST basándose en técnicas de optimización multi-objetivo. Se formula el problema de la planificación de la expansión del ST como un problema de optimización multi-objetivo donde se minimizan los costos de inversión de la expansión, los costos de operación del SEP y al mismo tiempo se maximizan la capacidad de absorber carga en cada nodo del sistema, sujetos a las restricciones del SEP. Este enfoque, mediante la aplicación del algoritmo evolutivo NSGA-II, nos permite identificar un conjunto eficiente de planes de expansión vinculados a un determinado margen de capacidad de abastecimiento nodal, con esta información sería posible diseñar políticas de crecimiento de la demanda, que nos permita maximizar el uso de la infraestructura existente y futura del ST.

PALABRAS CLAVES

Modelo AC dinámico, minimizar costos de inversión y costos de operación, maximizar la capacidad de absorber carga en cada barra, optimización multi-objetivo, política de crecimiento de la demanda, algoritmo evolutivo NSGA-II.



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas modernos de energía eléctrica tienen la responsabilidad de brindar un abastecimiento confiable y económico de la energía eléctrica a sus clientes. Los efectos económicos y sociales de la pérdida del servicio eléctrico pueden tener impactos significativos tanto en la utilidad de la empresa de suministro de energía eléctrica y los usuarios finales del servicio. El mantenimiento de un suministro fiable de energía es por lo tanto, un tema muy importante en el diseño de la expansión y operación de los SEP.

El término “confiabilidad” cuando se asocia con un SEP es una medida de la capacidad del sistema para satisfacer las necesidades de energía eléctrica de los consumidores [1]. El área general de la “confiabilidad”, se suele dividir en dos atributos:

- la seguridad del sistema y,
- adecuación del sistema

1.1. SEGURIDAD DE LOS SEP

La seguridad de los SEP se define como su capacidad para soportar perturbaciones. Esto implica que el sistema permanecerá íntegro, incluso después de interrupciones o fallas de equipos. La noción de seguridad identifica aspectos de la operación del sistema en corto plazo, los cuales se caracterizan a través del análisis de contingencias y de la determinación de la estabilidad dinámica.

1.2. ADECUACIÓN DE LOS SEP

La adecuación es la capacidad de un sistema eléctrico para suministrar energía eléctrica a los consumidores y los requerimientos de energía en todo momento. En lenguaje sencillo, la adecuación implica que son suficientes los recursos de generación y transmisión y están disponibles para las necesidades previstas de energía eléctrica. La adecuación es un concepto que tiene una connotación de más largo plazo que la seguridad, tanto en el segmento de generación como en el de transmisión, considerando las fluctuaciones, la incertidumbre inherente de la demanda eléctrica, la imposibilidad de almacenar la energía a gran escala y los extensos horizontes de tiempo necesarios para expandir la capacidad del sistema.

El presente trabajo se enfoca en obtener planes de expansión de sistemas de transmisión considerando al beneficio social y la política de crecimiento de la demanda como criterios para la toma de decisiones bajo el enfoque de la adecuación de sistemas de transporte de energía.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este trabajo se considera la demanda en cada barra del SEP de manera independiente mediante la aplicación de una tasa estimada de crecimiento anual uniforme para todo el sistema y un margen crecimiento sobre este, buscando que este margen sea el de mayor valor cumpliendo con todas las restricciones técnicas impuestas. Una característica particular del modelo propuesto es que el algoritmo evolutivo define el margen de crecimiento en el nodo i , pudiendo ser inclusive de menor valor que la tasa estimada de crecimiento dependiendo del estado que tome el SEP dentro del horizonte de planificación. Este enfoque, mediante la aplicación del algoritmo evolutivo NSGA-II, nos permite identificar un conjunto eficiente de planes de expansión vinculados a un determinado margen de capacidad de abastecimiento nodal, con esta información sería posible diseñar políticas de crecimiento de la demanda, que nos permita maximizar el uso de la infraestructura existente y futura del ST. A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra la demanda en un nodo i según el modelo que se propone en un horizonte de K años.

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

El modelo propuesto plantea la expansión de un SEP de N_b nodos, donde la demanda crece de acuerdo a una tasa estimada t_{dc} , y en el que se tiene como objetivos minimizar los costos del sistema y maximizar la tasa del margen de crecimiento.

La función de costo está compuesta por la suma del valor presente de las inversiones de las líneas de transmisión C_{inv}^k adicionadas a la red existente durante un horizonte de tiempo, y del costo de operación C_{op}^k como se muestran en la Ecuación (2).

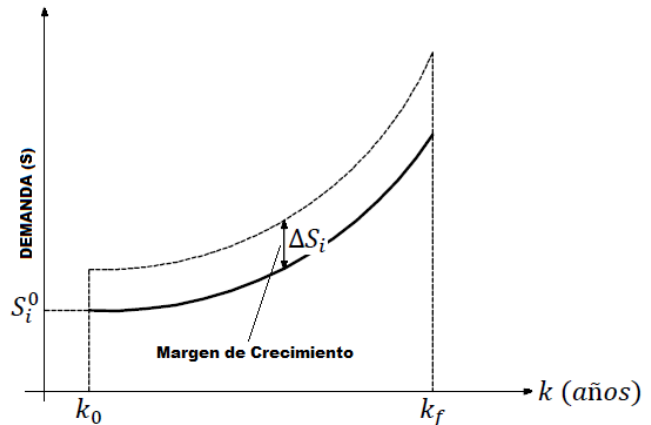


Figura 1: Proyección de Demanda del nodo i en K años para el modelo propuesto.

La tasa del margen de crecimiento ΔS_i es el factor, asociado a cada barra, que hace variable a la tasa de crecimiento estimada, pudiendo esta aumentarla o disminuirla asegurando el cumplimiento de las restricciones asociadas al sistema eléctrico como se puede observar en la Ecuación (3).

Las soluciones de la expansión del ST deben estar sujetas a las restricciones de balance de potencia en cada nodo (Ecuación (3)), límites de flujo de potencia en las líneas (Ecuación (4) y (5)), niveles de tensión y ángulo de fase (Ecuación (6)), límites de generación (Ecuación (7)), número de líneas a ser introducida en cada tramo entre los nodos ab (Ecuación (8)) y límites de márgenes de crecimiento para cada nodo ΔS_i representada en la Ecuación (9).

El modelo propuesto puede escribirse como:

$$\text{maximizar } \sum_{i=1}^{N_b} \Delta S_i \quad (1)$$

$$\text{minimizar } \left[\sum_{k=1}^k (C_{inv}^k) + C_{op}^k \right] \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\theta_i^i(\theta, V_m, S_g) = S_{bus}^i(\theta, V_m) + S_{g,i}^k \Delta S_i - C_g S_g^k = 0 \quad (3)$$

$$|SF_k(V_m, \theta)|^2 \leq (S_k^{max})^2 \quad (4)$$

$$|ST_k(V_m, \theta)|^2 \leq (S_k^{max})^2 \quad (5)$$

$$V_m^{i,min} \leq V_m^i \leq V_m^{i,max}, \quad \theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max}; \quad i = 1, \dots, N_b \quad (6)$$

$$S_g^{j,min} \leq S_g^j \leq S_g^{j,max}; \quad j = 1 \dots N_g \quad (7)$$

$$0 \leq n_{ab} \leq n_{ab}^{max}; \quad n_{ab} \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

$$\Delta S_i^{min} \leq \Delta S_i \leq \Delta S_i^{max}; \quad \Delta S_i \in \mathbf{R} \quad (9)$$

Donde

- θ_i V_m^i S_g^j FT
- Ángulo de la magnitud de tensión del nodo i.*
- Magnitud de tensión del nodo i.*
- Potencia aparente generada por el generador j.*
- Nodos del SEP*

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

$S_{a,i}^k$	S_{bus}^i	Potencia aparente inyectada al ST a través del nodo i .
		Demanda de potencia aparente del nodo i en el año k .
	C_g	Matriz de conexión de generadores.
	C_{inv}^k	Costo de inversión de nuevas Líneas de Transmisión en el año k .
	C_{op}^k	Costo de operación en el año k .
	ΔS_i	Tasa de margen de crecimiento de la demanda en el nodo i .
	n_{ab}	Número de líneas a ser introducida en el corredor $a-b$.
	$SF_{a,b}, ST_{a,b}$	Flujo de Potencia de la línea $a-b$ entre los nodos FT.
$S_{a,b}^{max}$		Flujo de Potencia máxima permitida en la línea $a-b$.

3. REPRESENTACIÓN DEL CROMOSOMA

Los Algoritmos Evolutivos (AE) son enfoques de propósito general, es decir, su funcionamiento y metodología de resolución son prácticamente independientes al problema de optimización a ser resuelto. Para poder aplicar un AE a un problema en particular es necesaria primeramente definir 1) la estructura del cromosoma, que básicamente representa una solución potencial al problema considerado y 2) un operador de cruce, acorde al cromosoma. En este trabajo fue utilizado como proceso de selección el torneo binario por sus características simples pero de alta eficiencia [2]. Seguidamente, se muestra la representación del cromosoma a través de la matriz cuadrada de dimensión $N_b \times N_b$ que se muestra en la Figura 2, donde los elementos por encima de la diagonal contienen la cantidad de líneas a ser introducidas entre las barras ij (i fila y j columna del cromosoma). Los elementos por debajo de la diagonal contienen el tiempo en que debe ser introducida las nuevas líneas de transmisión en un horizonte de tiempo y los elementos contenidos en la diagonal representan el margen de crecimiento sobre la demanda estimada para cada barra del sistema. Ésta matriz luego es representada por medio de vectores como se muestra en la Figura 3.

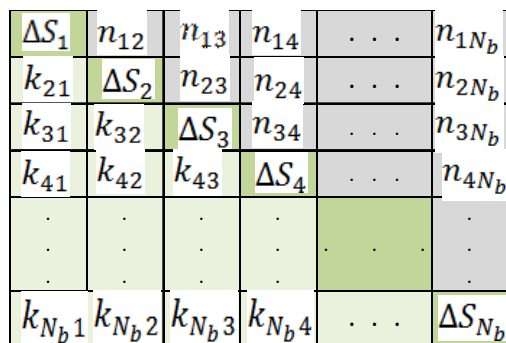


Figura 2: Representación del Cromosoma.

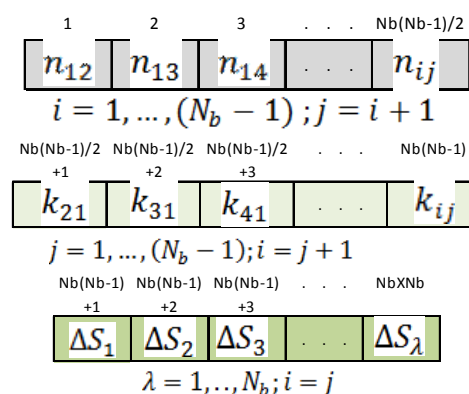


Figura 3: Representación vectorial del cromosoma.

En la operación cruce intervienen dos individuos padres seleccionados a través del torneo binario, para obtener como resultado del proceso dos individuos (descendientes) como se muestra en la Figura 4. La mutación es realizada mediante generación randómica de todos los genes del cromosoma.

La evaluación técnica y el cálculo del Costo de operación son calculados a través de ACOPF-PDIMP, cuyo algoritmo se encuentra disponible en el paquete de archivos Matpower 4.1[3]. Una característica particular en el algoritmo NSGA-II/ACOPF-PDIMP propuesto para resolver el problema de expansión de ST, es la consideración de la convergencia de las soluciones como función objetivo a maximizar dentro del proceso evolutivo; entonces internamente se tienen tres funciones objetivos como se muestra en la Figura 5.

Posteriormente se selecciona aquellas soluciones que convergen en todo el horizonte de planificación quedando de esta manera el análisis reducido en dos funciones objetivas que son el Margen de Crecimiento Acumulado y el Costo del Sistema representados por las Ecuaciones (1) y (2) respectivamente. En la Figura 6 se muestra el frente de Pareto del Margen de crecimiento Acumulado vs. Costo del Sistema.

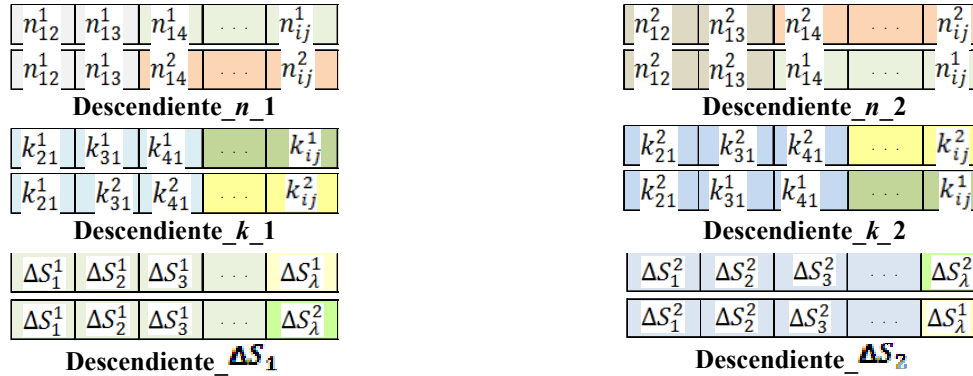


Figura 4: Operación de Cruce.



Figura 5: Ilustración de las tres Funciones Objetivas consideradas en el algoritmo NSGA-II/ACOPF_PDIMP.

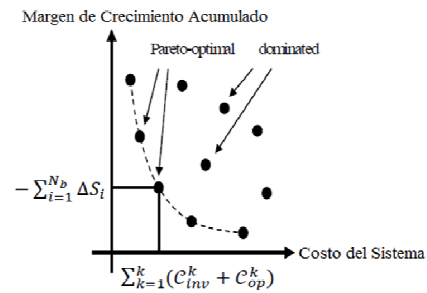


Figura 6: Frente de Pareto del Margen de Crecimiento Acumulado vs. Costo del Sistema.

En la Figura 6 se integra los dos ejes transversales de este trabajo de investigación que son: “La Política con la Planificación”. Cuando hablamos de Política nos referimos al diseño de un plan sujeto al manejo geográfico de la demanda representada por la Ecuación (1). Este enfoque nos permite identificar un conjunto eficiente de planes de expansión vinculados a un determinado margen de capacidad de abastecimiento nodal disperso geográficamente, con esta información sería posible diseñar políticas de crecimiento de la demanda que maximice el uso de la infraestructura existente y futura del ST. Al referirnos al término Planificación, no es otro que el Plan de Expansión del ST propiamente dicho. Un aspecto importante a tener en cuenta es que la Generación es conocida y cuyo límite es suficiente en el horizonte de estudio considerado. Entonces al obtener un conjunto de soluciones Pareto-Óptimas (Figura 6), permite al tomador de decisiones tener los dos enfoques:

- 1) En base a un crecimiento estimado y el conocimiento del margen que se tiene sobre este, determinar cuánto se debe invertir y el costo de operación para cubrir los requerimientos del sistema.
- 2) En base a un capital disponible, cuanto puede crecer, como y donde se puede distribuir el crecimiento de la demanda.

4. CASO DE ESTUDIO

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

El sistema que será analizado corresponde a la red, inicialmente, propuesta por Garver [4] con las variantes y costos considerados en [5] y [6] que ha sido ampliamente utilizada por los investigadores. Esta red está compuesta de seis nodos, tres generadores, seis líneas existentes y quince líneas de transmisión candidatas. El nodo 6 corresponde a una nueva central eléctrica. Los datos del de ST, los datos de los generadores y la demanda inicial del sistema Garver se muestran en las tablas 1,3 y 4 respectivamente. Su diagrama unilineal se muestra en la Figura 7.

Tabla 1: ST del Sistema Garver

desde el nodo	al nodo	R [pu]	X [pu]	Capacidad MW	Ángulo Límite	Longitud [milla]
1	2	0,10	0,40	100	±30	40
1	4	0,15	0,60	80	±30	60
1	5	0,05	0,20	100	±30	20
2	3	0,05	0,20	100	±30	20
2	4	0,10	0,40	100	±30	40
3	5	0,05	0,20	100	±30	20

Tabla 2: Datos de Generación

nodo	Capacidad [MW]	Capacidad [MVar]	Magnitud de Tensión [pu]	Costo de Operación [\$/MWh]
1	150	100	1,02	16,04
3	360	100	1,04	16,04
6	600	100	1,04	14,89

Tabla 3: Datos de cada nodo

nodo	Demanda [MW]	Demanda [MVar]	Magnitud de Tensión [pu]	Magnitud de Tensión máxima [pu]	Magnitud de Tensión mínima [pu]
1	20	0	1,02	1,10	0,90
2	60	10	1,04	1,10	0,90
3	10	0	1,04	1,10	0,90
4	40	6	1,00	1,10	0,90
5	60	10	1,00	1,10	0,90
6	0	0	1,00	1,10	0,90

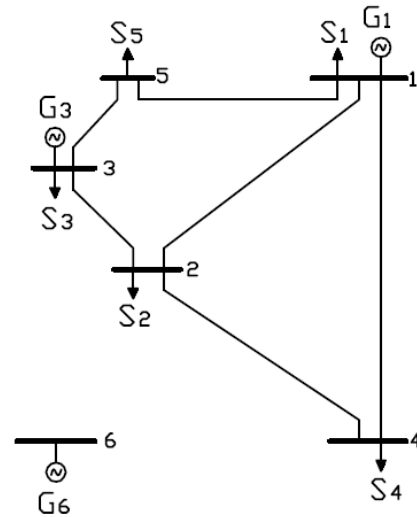


Figura 7: Sistema Garver

El modelo se aplica al sistema de estudio en el modo dinámico de la planificación. Se consideran tres horizontes de tiempo que son 5, 10 y 15 años, además para cada horizonte de estudio se considera una tasa de crecimiento estimada anual de 8%. Una tasa de descuento del 12% y una tasa de inflación del 4% es utilizada en el caso de estudio propuesto. El costo de instalación y el derecho de paso en una pasarela donde no existen líneas de transmisión son de 240.000\$/km, y 150.000 \$/km para cualquier línea adicional en una pasarela donde ya existen líneas de transmisión, en este último el derecho de paso no es considerado. El conjunto de líneas candidatas a ser instaladas en el sistema base de la Figura 4 se muestra en la Tabla 4.

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

Tabla 4: Conjunto de LT's Candidatas

desde el nodo	al nodo	R [pu]	X [pu]	Capacidad MW	Angulo Limite	Longitud [milla]
1	2	0,10	0,40	100	±30	40
1	3	0,09	0,38	100	±30	38
1	4	0,15	0,60	80	±30	60
1	5	0,05	0,20	100	±30	20
1	6	0,17	0,68	70	±30	68
2	3	0,05	0,20	100	±30	20
2	4	0,10	0,40	100	±30	40
2	5	0,08	0,31	100	±30	31
2	6	0,08	0,30	100	±30	30
3	4	0,15	0,59	82	±30	59
3	5	0,05	0,20	100	±30	20
3	6	0,12	0,48	100	±30	48
4	5	0,16	0,63	75	±30	63
4	6	0,08	0,30	100	±30	30
5	6	0,15	0,61	78	±30	61

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El primer paso de la experimentación para resolver el modelo propuesto a través del NSGA-II consiste en ajustar los cuatro parámetros más habituales, que son: número de generaciones (G), tamaño de la población (N^*), probabilidad de cruce (P_c) y probabilidad de mutación (P_m). La metodología aplicada para ajustar estos parámetros es similar a la propuesta en [6], en la que, partiendo de una configuración definida, se van fijando los valores de los parámetros uno a uno en su mejor valor. Para establecer el grado de bondad que tienen los frentes de Pareto obtenidos para cada configuración, se ha decidido utilizar una métrica conocida como hipervolumen [8]: a mayor valor, mejor es la solución.

El hipervolumen, también conocido como el S-métric o la medida de Lebesgue, ha sido recientemente utilizado como un indicador para comparar el rendimiento de los algoritmos evolutivos multi-objetivo (MOEAs). El hipervolumen de un conjunto de soluciones mide el tamaño de la porción de espacio objetivo que está dominada por las soluciones del conjunto [9]. En la Figura 8, la métrica hipervolumen se ilustra en un problema de optimización bi-objetivo para facilitar la visualización, donde a mayor porción del espacio de soluciones dominadas, implica mejores soluciones. En la Tabla 5 se muestra los valores de los parámetros evolutivos hallados según el método descripto.

Generaciones (G)	Población (N^*)	Probabilidad de Cruce (P_c)	Probabilidad de Mutación (P_m)
100	300	100%	50%

Una vez que se ha fijado los parámetros evolutivos en sus mejores valores, se procede a las evaluaciones experimentales del Sistema Garver con las diferentes tasas de crecimiento anual estimadas y horizontes de planificación mencionados anteriormente. En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos, los valores negativos tanto del margen de crecimiento acumulado y las convergencia que se observa en dicha figura solo son tenidos en cuenta dentro del proceso de evolución como un artificio, por consiguiente dentro de los análisis que realizaremos, nos limitaremos en tomar los valores numéricos de los mismos.

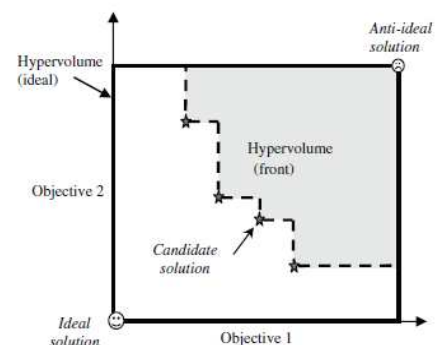


Figura 8: Hipervolumen de un conjunto de soluciones de un problema bi-objetivo [10].

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

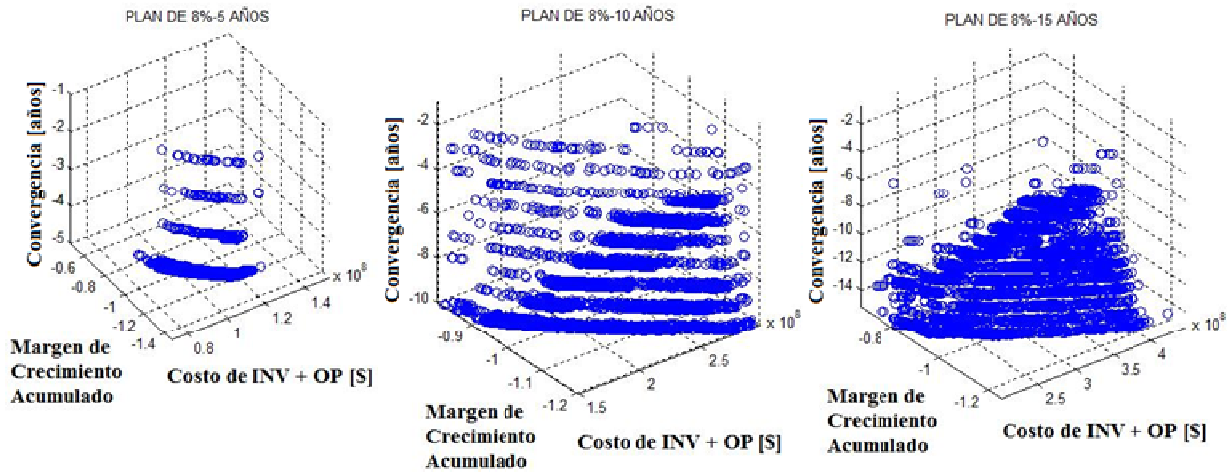


Figura 9: Soluciones del Sistema Garver.

En la Figura 10 se muestran planes de expansión considerando la convergencia de las soluciones, con una tasa de crecimiento anual estimada del 8% en horizontes de 5, 10 y 15 años, el conjunto de soluciones de color azul, verde y rojo representan los mejores frente de Pareto de los diferentes planes de expansión y contienen las mejores soluciones candidatas.

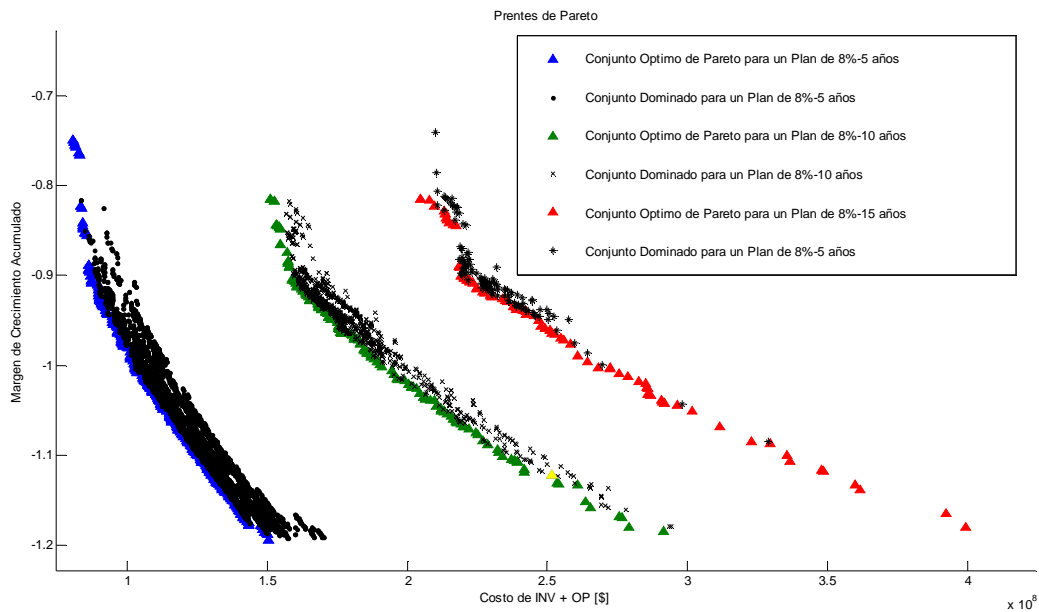


Figura 10: Soluciones del Sistema Garver considerando la convergencia.

A modo ilustrativo, del conjunto de soluciones de un plan de expansión con una tasa estimada de crecimiento del 8% en un horizonte de 10 años (color verde) seleccionamos la solución de color amarillo en el cual se tiene un costo de 251.570.000 \$ (Costo de Inversión= 13.234.196\$ y Costo de Operación= 238.335.804\$) y un margen de crecimiento acumulado aproximadamente igual a 1,1224 (representa un aumento promedio de alrededor de 12,24% de la tasa de crecimiento estimada) en 10 años. En la Figura 11 se muestra la solución en forma matricial a modo de tener una visión más amplia de la misma. En la Figura 12 se muestra el diagrama unilineal de la solución seleccionada al final del horizonte considerado.

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

nodo	1	2	3	4	5	6
1	1,1595	0	0	0	1	0
2	0	0,8723	0	0	0	0
3	0	0	1,1794	0	0	0
4	0	0	0	1,1442	0	1
5	9	0	0	0	1,1838	0
6	0	0	0	1	0	1,1954

Figura 11: Representación matricial de la solución seleccionada.

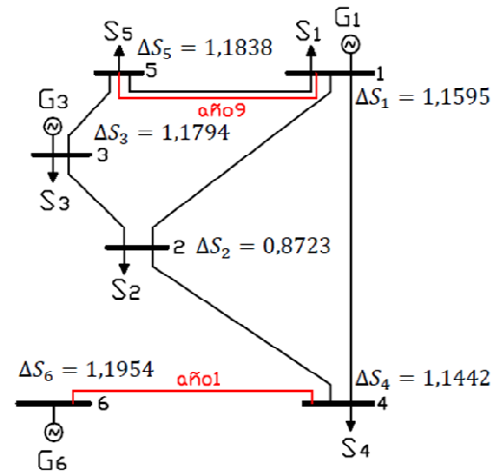


Figura 12: Diagrama unilineal de la solución seleccionada al final del horizonte considerado.

CONCLUSIONES

El modelo matemático propuesto ofrece una metodología para el análisis de la expansión de redes eléctricas de transmisión en un ambiente multi-objetivo, a fin de dar opciones para la solución del problema de la planificación de expansión de ST donde se minimizan los costos de inversión de la expansión, los costos de operación del SEP y al mismo tiempo se maximizan la capacidad de suministrar carga en cada nodo geográficamente dispersa en el SEP.

La gran ventaja de este modelo es que se optimiza la demanda en cada nodo individualmente. Por consiguiente, es posible determinar hasta qué punto el SEP es capaz de abastecer a una nueva carga en una región específica de la red con un plan de expansión del ST dado. Además, con esta información se podría diseñar políticas de crecimiento de la demanda que permita maximizar el uso de la infraestructura existente y futura del ST.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del NSGA-II/ACOPF-PDIMP al sistema de estudio presentan, un excelente desempeño y robustez para la metodología propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mohammad Shahidehpour, William F. Tinney and Yong Fu, "Impact of Security on Power Systems Operation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, november 2005.
- [2] Carlos Núñez, Benjamín Barán y Diego Pinto, "Asignación Óptima de Lighpath bajo requerimientos QoS. Un enfoque multi-objetivo basado en MOEAs", *Universidad Nacional de Asunción*.
- [3] Ray D. Zimmerman and Carlos E. Murillo-Sánchez, "Matpower 4.1 User's Manual", December 14, 2011.
- [4] L.L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688-1697, Sept/Oct 1970.
- [5] H. K. M. Youssef, "Dynamic Transmission Planning Using a Constrained Genetic Algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier*, vol. 23, Nov 01, pp. 857-862.



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

-
- [6] P. Vasquez, Z.A. Styczynski and A. Vargas, "Flexible Decision Making-Based Framework for Coping with Risks existing in Transmission Expansion Plans", *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, págs. 1 - 9, 13-15 Aug. 2008.
 - [7] A. Rubio-Largo, M.A. Vega-Rodriguez, J.A. Gomez-Pulido, y J.M. Sanchez-Perez, "A Differential Evolution with Pareto Tournaments for solving the Routing and Wavelength Assignment problem in WDM networks", *IEEE Congress on Evolutionary Computation, Barcelona, Spain: 2010*, págs. 1-8.
 - [8] Fonseca, C., Knowles, J., Thiele, L., Zitzler, E., "A Tutorial on the Performance Assessment of Stochastic Multiobjective Optimizers", *EMO 2005*.
 - [9] L. Bradstreet, L. While and L. Barone, "A Fast Incremental Hypervolume Algorithm", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 6, December 2008.
 - [10] S.F. Adra, T.J. Dodd, I. A. Griffin and P.J. Fleming, "Convergence Acceleration Operator for Multi-objective Optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 4, August 2009.