

Identificación de variables principales en el planeamiento de redes de transmisión usando técnicas heurísticas basadas en PLE y PNLE

Principal variables identification in transmission network planning using heuristic techniques based on ILP and INLP

Laura Mónica Escobar Vargas, Antonio Hernando Escobar Zuluaga, José Nicolás Melchor Gutiérrez, Alejandro Duque Gómez

Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

lamoescobar@utp.edu.co

aescobar@utp.edu.co

jnmelchor@utp.edu.co

aduque55@utp.edu.co

Resumen— En este artículo se presenta una propuesta de reducción del espacio de solución en el problema de planeamiento de redes de transmisión que consiste en utilizar técnicas heurísticas basadas en métodos de programación lineal entera (PLE) y programación no lineal entera (PNLE) para la identificación de variables principales. El desempeño de estas técnicas se compara con el de técnicas heurísticas convencionales basadas en modelos relajados que eliminan la condición entera de las variables de decisión. Los resultados muestran un desempeño superior a las técnicas heurísticas convencionales junto a un ligero aumento del tiempo computacional en sistemas de prueba de tamaño y dificultad baja y media.

Palabras clave— Componentes principales, espacio de solución, heurísticas, lenguaje de modelamiento, optimización, planeamiento, sistemas de transmisión.

Abstract— This paper presents a proposal to reduce the solution space in the transmission network planning problem, which consists of using heuristic techniques based on integer linear programming (ILP) methods and integer non-linear programming (INLP) methods to identify principal variables. The performance of these techniques is compared to the performance of conventional techniques where the condition of integer decision variables is eliminated. The results show a superior performance to the conventional heuristic techniques with a little increase in computation time in test systems of medium and small size and medium and low difficulty.

Key Words — Heuristics, modeling language, optimization, planning, principal components, solution space, transmission systems

I. INTRODUCCIÓN

En el problema del planeamiento a largo plazo de la expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica se determinan las inversiones que deben ser realizadas para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico de potencia dado un escenario de generación y demanda proyectado en un periodo de 10 o más años. Las inversiones consideran la adición de nuevas subestaciones, el refuerzo de subestaciones existentes o la construcción de nuevas líneas de transmisión en corredores de transmisión nuevos o existentes.

Este problema se encuentra en la categoría de problemas no lineales enteros mixtos de difícil solución, el cual se resuelve mediante modelos matemáticos aproximados. El modelo puede ser escrito de forma que pueda resolverse usando técnicas de programación lineal sucesiva o de programación lineal entera. En el caso de las técnicas lineales sucesivas, el proceso es guiado por técnicas heurísticas. El problema es multimodal, lo que implica la presencia de múltiples soluciones subóptimas.

En [1] y [2], se encuentra una reseña histórica de la forma en que ha evolucionado el problema de planeamiento de redes de transmisión tanto en su modelamiento matemático como en las técnicas implementadas para su solución.

Cuando la complejidad del sistema es alta (gran cantidad de nodos, sistemas de transmisión altamente enmallados, gran cantidad de líneas y subestaciones candidatas y un alto nivel de desconexión), el resultado es una explosión combinatorial en la que se forma un conjunto de respuestas factibles tan grande que cualquier aproximación por medio de técnicas exactas resulta insuficiente para encontrar la solución óptima global del problema. Incluso para las técnicas de optimización combinatorial esta resulta una tarea sumamente complicada [3].

En este artículo se analiza la utilidad de usar técnicas heurísticas constructivas, basadas en métodos de programación lineal entera (PLE) y programación no lineal entera (PNLE) en la identificación eficiente de inversiones de gran importancia y que influyen considerablemente en la solución final del problema de planeamiento. El fundamento de esta metodología consiste en aprovechar la efectividad que ofrecen las técnicas heurísticas constructivas, basadas en las técnicas exactas mencionadas para reducir la cantidad de variables que constituyen el problema de planeamiento de la transmisión a un grupo reducido de variables principales, con el objetivo de mejorar el desempeño de técnicas de optimización robustas.

II. CONTENIDO

A. Nomenclatura

Ω , conjunto de corredores de transmisión en los que se puede hacer adiciones.

C_{ij} , costo de construcción de un circuito entre los nodos i - j .

n_{ij} , número de circuitos adicionados entre los nodos i - j

S , matriz de incidencia nodo-rama del sistema.

\bar{n}_{ij} , número máximo de adiciones permitidas en el corredor i - j .

n_{ij}^o , número de circuitos existentes en la red inicial en el corredor i - j .

n_{ij}^k , número de circuitos adicionados manualmente en el corredor i - j .

f_{ij} , flujo de potencia total en el corredor i - j .

\bar{f}_{ij} , flujo de potencia máximo en un circuito del corredor i - j .

g_i , generación del nodo i .

d_i , demanda del nodo i .

S_o , matriz de incidencia nodo-rama del sistema existente.

f'_{ij} , flujo de potencia activa por los elementos adicionados entre los nodos i - j .

f''_{ij} , flujo de potencia activa por los elementos existentes entre los nodos i - j .

θ_i , ángulo de fase de la tensión en el nodo i .

γ_{ij} , susceptancia del elemento conectado entre los nodos i - j .

x_{ij} , reactancia del elemento conectado entre los nodos i - j .

Ω_r , conjunto de nodos con demanda de energía eléctrica.

α , costo de penalización por MW no atendido.

M , parámetro de valor muy grande que permite la inclusión de la 2LK asociada a la variable binaria cuyo valor sea 1.

B. Modelamiento matemático

Diversos tipos de modelos son utilizados en la literatura especializada, para la representación del problema de planeamiento de largo plazo del sistema de transmisión de energía eléctrica: el modelo de transportes, el modelo híbrido lineal, el modelo DC y el modelo lineal disyuntivo. Los modelos planteados a continuación presentan una ligera variación respecto a los modelos presentados normalmente en la literatura especializada [4], ya que para este caso se incluye un vector n_{ij}^k que permite construir de manera iterativa las propuestas de solución según como es indicado por las técnicas heurísticas constructivas implementadas.

1. Modelo de transportes.

Fue el primer modelo matemático propuesto para el problema de planeamiento de la transmisión de energía eléctrica [5]. Con este modelo se dio inicio a la sistematización de los diferentes problemas de planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica. El modelo de transportes surge como una alternativa al modelo de flujo de carga AC, que presenta grandes dificultades para ser resuelto con las técnicas de optimización existentes, cuando se usa para representar el problema de planeamiento. Se trata de un modelo relajado donde sólo se exige el cumplimiento de la primera ley de Kirchhoff.

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$Sf + g = d$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij}^k + n_{ij}) \bar{f}_{ij}$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$$

$$n_{ij} \text{ entero}$$

2. Modelo híbrido lineal:

Es un modelo intermedio entre el modelo de transportes y el modelo de flujo de carga DC. En este caso, se aplica la primera ley de Kirchhoff tanto a la red base como a la red formada por los elementos adicionados. A la red base se le aplica adicionalmente la segunda ley de Kirchhoff.

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2)$$

s.a.

$$\begin{aligned}
Sf' + S_o f_o + g &= d \\
f_{ij}^o &= (\theta_i - \theta_j) \gamma_{ij} n_{ij}^o \\
|\theta_i - \theta_j| &\leq \overline{f_{ij}} x_{ij} \\
|f_{ij}| &\leq (n_{ij} + n_{ij}^k + n_{ij}^o) \overline{f_{ij}} \\
\underline{g}_i &\leq g_i \leq \overline{g}_i \\
0 &\leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \\
\theta_k &= 0; \text{ k: índice del nodo slack} \\
n_{ij} &\text{ entero}
\end{aligned}$$

3. Modelo DC

En este modelo se aplican la primera y segunda ley de Kirchhoff tanto a los elementos existentes en la red base como a aquellos adicionados en corredores nuevos o existentes. Para permitir encontrar una solución en los casos en que no existe suficiente capacidad de transmisión, se agrega un generador ficticio en cada nodo de carga. El modelo DC es no lineal entero-mixto (PNLEM).

$$\begin{aligned}
\min v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{i \in \Omega_r} r_i \quad (3) \\
s.a. \\
sf + g + r &= d \\
f_{ij} &= (\theta_i - \theta_j) (n_{ij} + n_{ij}^k + n_{ij}^o) \gamma_{ij} \\
|\theta_i - \theta_j| &\leq \overline{f_{ij}} x_{ij} \\
\underline{g}_i &\leq g_i \leq \overline{g}_i \\
0 &\leq r_i \leq d_i \\
0 &\leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \\
\theta_k &= 0; \text{ k: índice del nodo slack} \\
n_{ij} &\text{ entero}
\end{aligned}$$

4. Modelo Lineal Disyuntivo:

Es una modificación del modelo DC, que es un modelo no lineal entero mixto, para convertirlo en un problema lineal entero con variables binarias. Esto se logra reemplazando la no linealidad del modelo DC (causada por el producto entre el ángulo de fase y el número de adiciones para cada corredor de transmisión) por relaciones lineales independiente con variables binarias.

$$\begin{aligned}
\min v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} \sum_{k=1}^{\overline{n_{ij}}} C_{ij} Y_{ijk} + \alpha \sum_{i \in \Omega_r} r_i \quad (4) \\
s.a.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Sf + g + r &= d \\
f_{ijk} - (\theta_i - \theta_j) \gamma_{ij} &\leq M(1 - Y_{ijk}) \\
f_{ij}^0 - (\theta_i - \theta_j) (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \gamma_{ij} &= 0 \\
|\theta_i - \theta_j| &\leq \overline{f_{ij}} x_{ij} \\
\underline{g}_i &\leq g_i \leq \overline{g}_i \\
0 &\leq r_i \leq d_i \\
\theta_s &= 0; \text{ s: índice del nodo slack} \\
Y_{ijk} &\text{ binario}
\end{aligned}$$

En este modelo se debe determinar un valor adecuado del parámetro M para el correcto funcionamiento del sistema de solución del problema. Este valor se ajusta mediante pruebas de ensayo y error para cada caso particular [2,5].

C. Identificación de variables principales del planeamiento de redes de transmisión

Debido a la explosión combinatorial que presenta el problema de planeamiento de redes de transmisión, se forma todo un espacio de solución que incluye soluciones de mala y buena calidad. Comúnmente, el tamaño del espacio de solución está directamente relacionado con el tamaño del sistema a analizar, sin embargo, influyen otros factores como la conectividad de los nodos o que tan enmallado sea el sistema.

La solución de sistemas complejos con técnicas exactas puede involucrar largos periodos de tiempo, haciendo prohibitiva su aplicación. Las técnicas heurísticas convergen a sub-espacios de buena calidad, pero no encuentran la solución óptima global para el caso de sistemas complejos. Por otro lado, las técnicas metaheurísticas entregan soluciones de muy buena calidad en la mayoría de los casos, con el inconveniente de que el ajuste de parámetros de la técnica aplicada puede tardar mucho tiempo y no se garantiza encontrar la solución óptima global.

De ahí surge la importancia de desarrollar mecanismos que le permitan a la técnica de solución seleccionar sub-espacios de buena calidad de forma inteligente, que permitan encontrar rápida y fácilmente la solución óptima global o en su defecto, soluciones de muy buena calidad.

Se han realizado diferentes propuestas de este tipo para el problema de planeamiento de redes de transmisión. En [6] se disminuye el espacio de solución mediante adiciones previas de líneas de transmisión indicadas por un recocido simulado y un algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), para ejecutar finalmente un *Branch and Bound* que termina de solucionar el problema. En [7] se adicionan restricciones al modelo matemático para evitar evaluar partes del espacio de solución donde no está la solución óptima global, esto se logra mediante la técnica *Branch and Cut*. En [8] se implementa un algoritmo genético para un número reducido de

iteraciones (“Microgenético”) con el objetivo de identificar las variables principales del problema y entregarlas como datos de entrada a la técnica de solución principal (Algoritmo genético de Chu-Beasley).

Los algoritmos heurísticos constructivos aplicados tradicionalmente en el problema de planeamiento de redes de transmisión son usados en la actualidad para reducir el espacio de solución que deben explorar las técnicas de solución más robustas [9]. La característica más común y representativa de estos algoritmos es que en cada iteración se resuelve un modelo matemático relajado en el que se elimina la condición de entero de las adiciones de elementos en los corredores de transmisión, obteniendo así problemas de programación lineal y programación no lineal que son relativamente más fáciles de resolver.

D. Identificación de variables principales usando técnicas heurísticas basadas en PLE y PNLE

Para este caso en particular se quiso estudiar la viabilidad y utilidad de implementar algoritmos heurísticos constructivos en los que no se elimine la condición de entero de las variables de inversión. Es decir, se busca resolver de manera progresiva e iterativa el modelo exacto del problema de planeamiento de redes de transmisión, aplicación sobre el cual no se encuentra registro en la literatura especializada. A pesar de que el proceso de solución para este tipo de algoritmos a simple vista resulta más lento que los algoritmos tradicionales (en este caso, se resuelven problemas de programación lineal entera y programación no lineal entera en cada iteración), se busca un aumento en la cantidad de variables principales identificadas que pertenezcan a la solución óptima global del problema bajo un incremento tolerable del tiempo computacional empleado. Esta idea se basa en el concepto de que una técnica heurística guiada por respuestas de problemas de programación lineal entera o programación no lineal entera resulta más fiel al problema de planeamiento de redes de transmisión original, en el que se exige la condición de entero para las variables de decisión del problema.

En este estudio se compara el desempeño de las técnicas heurísticas basadas en métodos relajados (en los que se elimina la condición de entero de las variables de decisión) y el desempeño de las técnicas heurísticas basadas en métodos de programación lineal entera y programación no lineal entera (en los que se incluye la condición de entero de las variables de decisión) y que son aplicadas tradicionalmente en el problema de planeamiento de redes de transmisión. Para realizar esta comparación se propone un algoritmo heurístico constructivo básico, en el que de manera iterativa, se adiciona un elemento al corredor de transmisión con el mayor índice de sensibilidad hasta cumplir un criterio de parada que será explicado más

adelante. Se aplicaron 3 variaciones fundamentales al algoritmo básico, que permitieron analizar el desempeño de cada alternativa desde múltiples perspectivas. Las variaciones aplicadas al algoritmo heurístico constructivo básico fueron las siguientes:

- **Modelo matemático implementado:** A partir de esta variación surgen 4 algoritmos diferentes. En cada variación de este tipo se representa el problema de planeamiento de redes de transmisión mediante el modelo de transportes (1), el modelo híbrido lineal (2), el modelo DC (3) y el modelo lineal disyuntivo (4).
- **Condición de entero:** Una vez seleccionado el modelo matemático usado para representar el problema, se plantea un primer caso en que se omite la condición de entero de las variables de decisión (técnicas heurísticas basadas en modelos relajados) y un segundo caso en que se exige el cumplimiento de la condición de entero de las variables de decisión (técnicas heurísticas basadas en métodos de programación lineal entera y no lineal entera). Esta variación no se aplicó al modelo lineal disyuntivo, ya que su solución con variables continuas es igual a la del modelo DC sin la condición de entero.
- **Índice de sensibilidad:** Se usaron 3 índices de sensibilidad diferentes. El primero de ellos se basó en la cantidad de elementos a adicionar en cada corredor (n_{ij}). El segundo índice de sensibilidad fue el producto entre la cantidad de elementos a adicionar en cada corredor y la capacidad de transmisión de potencia activa de un elemento del mismo corredor ($n_{ij} \overline{f_{ij}}$). Con este índice de sensibilidad se favorecen aquellas adiciones que transmitan la mayor cantidad de potencia activa dentro de la propuesta de solución. El tercer índice de sensibilidad fue el producto entre la cantidad de elementos a adicionar en cada corredor con la capacidad de transmisión de potencia activa de un elemento del mismo corredor, dividido entre el costo de inversión de un elemento en ese corredor ($n_{ij} \overline{f_{ij}} / C_{ij}$). Para este último caso se favorecen las adiciones con la mejor relación costo-beneficio.

Al combinar estas 3 variaciones fundamentales, se obtienen 21 aplicaciones diferentes del algoritmo heurístico constructivo que permiten establecer una comparación entre la clase de técnicas implementadas tradicionalmente y las propuestas en este artículo. Se aclara que a pesar de que en el modelo lineal disyuntivo no se hace distinción entre variables enteras y continuas, es considerado en este caso porque implícitamente es un modelo lineal en el que se exige la condición de entero de las variables, esto permitió realizar una comparación entre la solución obtenida con KNITRO en el modelo DC y con CPLEX en el modelo lineal disyuntivo. Para el caso en que se omite la condición de entero, el desempeño de ambos solvers con ambos modelos es idéntico.

Para todas las técnicas se estableció un criterio de parada riguroso, en el que se acude a soluciones óptimas conocidas de la literatura especializada para los sistemas de prueba utilizados (Sistema de Garver, Pereira y Sur Brasileiro), los cuales son considerados como sistemas pequeños, de baja y media complejidad. Por tal motivo se exigió a la técnica heurística constructiva que la propuesta de adición indicada por el índice de sensibilidad en cada iteración debía coincidir con alguna de las adiciones presentadas en la solución óptima conocida (Solución de referencia). Se asume por lo tanto que las variables principales para cada uno de estos sistemas son las que indica la técnica heurística en cada iteración. En el momento en que la técnica proponga una adición que no corresponde con la solución de referencia, se da por concluido el algoritmo y se cuenta la cantidad de variables principales que fueron identificadas de forma continua y que corresponden con las adiciones de la solución de referencia. El algoritmo heurístico básico implementado en este trabajo se presenta formalmente en la figura 1.

Se usó el lenguaje de modelamiento matemático AMPL en conjunto con los solvers CPLEX y KNITRO para resolver los modelos que se construyen en cada iteración de las técnicas heurísticas constructivas. El solver CPLEX fue utilizado para resolver los problemas de programación lineal y programación lineal entera formulados en los modelos de transportes, híbrido lineal y lineal disyuntivo. Por otro lado, el solver KNITRO fue utilizado para resolver los problemas de programación no lineal y programación no lineal entera formulados en el modelo DC. El buen desempeño de estas herramientas en la solución del problema de planeamiento de redes de transmisión es mostrado en [2].

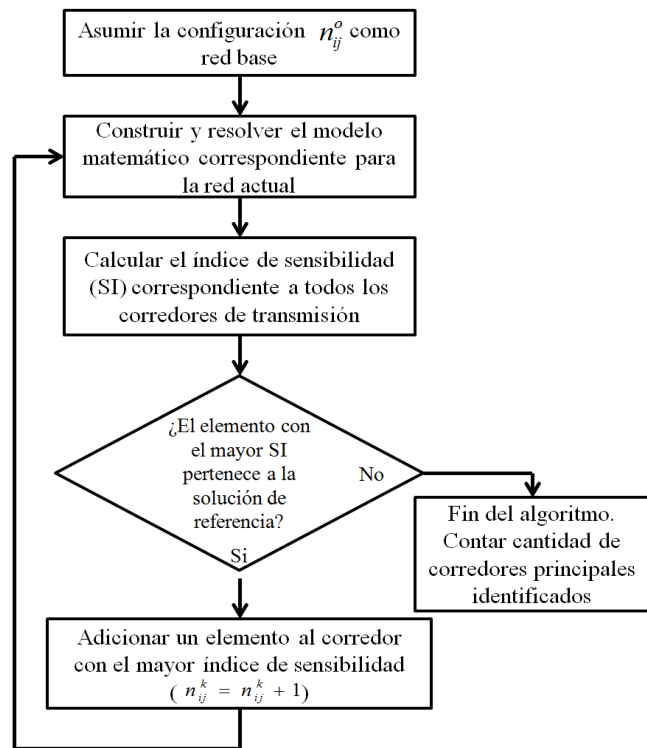


Figura 1. Algoritmo heurístico constructivo básico

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se ejecutaron todas las variaciones del algoritmo heurístico constructivo básico planteadas en la sección 2.3 para los sistemas de prueba Garver (6 nodos y 15 líneas candidatas), Pereira [11] (24 nodos y 38 líneas candidatas) y Sur Brasileiro (46 nodos y 79 líneas candidatas). Las soluciones de referencia para los sistemas Sur Brasileiro y Garver se presentan en [10], para estos dos sistemas de prueba se consideraron tanto los casos sin redespacho como los casos con redespacho. Aunque dentro de la información disponible para el sistema de prueba de Pereira se encontraban diferentes escenarios de generación proyectados para el año 2020, fue necesario crear un escenario de generación particular con redespacho para asegurar la conexión de todos los nodos en la solución final. Por tal motivo, se tomaron como soluciones de referencia las respuestas presentadas en la **Tabla 1**, obtenidas en una instancia independiente de la investigación que enmarca este artículo [11].

	Modelo matemático planteado		
	Trans.	Híb. Lin.	DC
n₂₋₅		1	
n₂₋₁₅			1
n₆₋₁₂	1	1	1
n₇₋₁₄	1	1	1
n₁₁₋₁₉	1	1	1

n_{12-24}	1	1	1
n_{15-23}	1	1	1
Costo [10 ³ US \$]	2455	2607	2636

Tabla 1. Soluciones de referencia para el sistema Pereira

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los algoritmos heurísticos constructivos implementados. La presentación permite una comparación directa de la cantidad de variables principales que coinciden con la solución de referencia identificadas por la técnica heurística basada en un modelo relajado y su par basada en PLE o PNLE según el caso. La palabra “Óptimo” indica que la técnica heurística solicitó de manera continúa la adición de elementos pertenecientes a la solución de referencia hasta corresponder totalmente con esta.

A. Modelo de transportes:

I.S.	Sistema	Variables principales	
		n_{ij} continuo	n_{ij} entero
n_{ij}	Garver SR	Óptimo	Óptimo
	Garver CR	2	Óptimo
	Pereira	Óptimo	Óptimo
	Sur B. SR	2	12
	Sur B. CR	4	Óptimo
$n_{ij} * f_{ij}$	Garver SR	Óptimo	Óptimo
	Garver CR	2	Óptimo
	Pereira	Óptimo	Óptimo
	Sur B. SR	7	Óptimo
	Sur B. CR	2	Óptimo
$n_{ij} * f_{ij} / c_{ij}$	Garver SR	Óptimo	Óptimo
	Garver CR	1	Óptimo
	Pereira	Óptimo	Óptimo
	Sur B. SR	7	Óptimo
	Sur B. CR	5	Óptimo

Tabla 2. Desempeño de algoritmos para el modelo de transportes

B. Modelo híbrido lineal:

I.S.	Sistema	Variables principales	
		n_{ij} continuo	n_{ij} entero
n_{ij}	Garver SR	Óptimo	Óptimo
	Garver CR	Óptimo	Óptimo
	Pereira	5	5
	Sur B. SR	4	13
	Sur B. CR	6	4
$n_{ij} * f_{ij}$	Garver SR	Óptimo	Óptimo

	Garver CR	4	Óptimo
	Pereira	5	4
	Sur B. SR	8	11
	Sur B. CR	6	Óptimo
$n_{ij} * f_{ij} / c_{ij}$	Garver SR	Óptimo	Óptimo
	Garver CR	4	4
	Pereira	5	5
	Sur B. SR	8	11
	Sur B. CR	6	Óptimo

Tabla 3. Desempeño de algoritmos para el modelo híbrido lineal

C. Modelo DC:

I.S.	Sistema	Variables principales	
		n_{ij} continuo	n_{ij} entero
n_{ij}	Garver SR	4	Óptimo
	Garver CR	Óptimo	Óptimo
	Pereira	4	Óptimo
	Sur B. SR	0	4
	Sur B. CR	4	5
$n_{ij} * f_{ij}$	Garver SR	5	Óptimo
	Garver CR	4	Óptimo
	Pereira	4	Óptimo
	Sur B. SR	0	Óptimo
	Sur B. CR	4	6
$n_{ij} * f_{ij} / c_{ij}$	Garver SR	4	Óptimo
	Garver CR	4	Óptimo
	Pereira	2	Óptimo
	Sur B. SR	0	Óptimo
	Sur B. CR	4	4

Tabla 4. Desempeño de algoritmos para el modelo DC

D. Modelo lineal disyuntivo:

I.S.	Sistema	Variables principales
		n_{ij} binario
n_{ij}	Garver SR	Óptimo
	Garver CR	Óptimo
	Pereira	Óptimo
	Sur B. SR	6
	Sur B. CR	Óptimo
$n_{ij} * f_{ij}$	Garver SR	Óptimo
	Garver CR	4

	Pereira	2
	Sur B. SR	14
	Sur B. CR	Óptimo
$n_{ij} * f_{ij} / c_{ij}$	Garver SR	Óptimo
	Garver CR	4
	Pereira	Óptimo
	Sur B. SR	15
	Sur B. CR	Óptimo

Tabla 5. Desempeño de algoritmos para el modelo lineal disyuntivo

Al comparar el desempeño de las técnicas heurísticas constructivas basadas en modelos relajados (n_{ij} continuo) con el desempeño de las técnicas heurísticas constructivas basadas en métodos de programación lineal entera y programación no lineal entera (n_{ij} entero) se logra apreciar que las técnicas propuestas en este artículo presentan un desempeño superior en la mayoría de los casos y cuando menos un desempeño similar al de las técnicas heurísticas constructivas tradicionales.

Las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE aplicadas al modelo de transportes lograron identificar de manera continua y en la mayoría de los casos todos los elementos correspondientes a la solución óptima de los diferentes sistemas de prueba, superando contundentemente el desempeño de las técnicas heurísticas constructivas basadas en modelos relajados. El único caso donde no se logró identificar todos los componentes de la solución de referencia fue en el sistema sur brasilero sin redespacho, sin embargo, se lograron identificar 12 de los 13 elementos propuestos en la solución de referencia, aspecto que no deja de ser remarcable.

Para los algoritmos heurísticos constructivos aplicados con el modelo híbrido lineal se encontró un comportamiento en cierta medida similar, destacándose las respuestas obtenidas para el sistema sur brasilero sin redespacho con las técnicas aquí propuestas.

En el caso del modelo DC se observa que las técnicas heurísticas constructivas basadas en modelos relajados no logran identificar más de 5 variables principales correspondientes a las soluciones de referencia en cualquiera de los sistemas de prueba utilizados. Sin embargo, estas se ven en algunos casos ligeramente superadas por las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE. Vale la pena destacar que el modelo DC es el más complejo de los modelos aquí presentados y que es considerado el modelo ideal para el problema de planeamiento de redes de transmisión, por lo que cualquier mejora en este tipo de técnicas, por más pequeña que sea tiene un alto valor.

Aunque el modelo lineal disyuntivo es una modificación lineal del modelo DC donde implícitamente se exige el cumplimiento de la condición de entero de las variables, haciendo las técnicas heurísticas constructivas aplicadas en este modelo semejantes a las aplicadas en el modelo DC, se encontró un comportamiento diferente pero con un desempeño superior al de las técnicas heurísticas tradicionales. La diferencia en el comportamiento se atribuye a que estos modelos tienen en común su solución óptima pero difieren en la forma de su espacio de solución, haciendo que la exploración de cada uno de estos se realice de maneras diferentes.

De manera general se establece que las técnicas heurísticas constructivas basadas en modelos relajados lograron identificar el 83% de los elementos de la solución de referencia para el sistema de Garver, el 66% de los elementos de la solución de referencia para el sistema Pereira y el 38% de los elementos de la solución de referencia para el sistema Sur Brasilero. Por otro lado, las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE lograron identificar el 100% de los elementos de la solución de referencia para el sistema de Garver, el 88% de los elementos de la solución de referencia para el sistema Pereira y el 82% de los elementos de la solución de referencia para el sistema Sur Brasilero. De igual manera se destaca el desempeño de las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE en la identificación de variables principales en el sistema Sur Brasilero sin redespacho con todos los modelos presentados, ya que este es tal vez el sistema de prueba más complejo de los empleados para este artículo.

En lo que respecta al tiempo computacional, debido a la interfaz propia de AMPL, solo fue posible medir el tiempo computacional empleado para la construcción y solución de los modelos matemáticos en cada iteración y no el tiempo total de ejecución de cada algoritmo, esto se debe a que las adiciones que iban indicando las técnicas heurísticas debían ser comparadas con las soluciones de referencia para que luego fueran adicionadas manualmente sobre la base de datos que fue procesada en cada iteración por el mismo programa [12]. Este tiempo computacional variaba notoriamente a medida que se avanzaba en cada algoritmo, sin embargo, de manera general se logró determinar un incremento medio cercano al 32% para las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE con respecto a las técnicas heurísticas constructivas basadas en modelos relajados, aplicadas tradicionalmente en el problema de planeamiento de redes de transmisión. Este incremento en el tiempo computacional se considera tolerable tratándose de sistemas de prueba de tamaño pequeño y dificultad baja donde el tiempo de solución es de fracciones de segundos para el sistema Garver y de unos cuantos segundos para el sistema Sur Brasilero.

IV. CONCLUSIONES

Se presentó una nueva propuesta para la reducción del espacio de solución en el problema de planeamiento de redes de transmisión utilizando técnicas heurísticas basadas en métodos

de programación lineal entera (PLE) y programación no lineal entera (PNLE) para la identificación de variables principales.

Se comprobó la efectividad de esta propuesta a la hora de identificar variables principales que coinciden con soluciones de referencia conocidas para sistemas de prueba utilizados en la literatura especializada.

Se encontró un desempeño superior de las técnicas heurísticas constructivas basadas en PLE y PNLE propuestas con respecto a las técnicas basadas en modelos relajados comúnmente utilizadas en el problema de planeamiento de redes de transmisión. Esta mejora en el desempeño se presenta bajo un incremento en el tiempo computacional empleado para resolver los modelos matemáticos de programación lineal entera y no lineal entera usados en la metodología presentada.

La reducción del espacio de solución se puede aplicar modificando los límites del número de adiciones permitidas en cada corredor. Para aquellos corredores identificados como variables principales, este límite se reemplaza por el valor indicado por la técnica heurística constructiva con una unidad adicional. En el caso de los corredores que no sean catalogados como variables principales, el límite se reduce a un valor menor que el original (1 o 2 elementos por corredor).

La aplicación de estas metodologías resulta conveniente y viable en sistemas de prueba con tamaño y complejidad media. Cuando el sistema eléctrico analizado es de gran tamaño el tiempo computacional empleado para solucionar los modelos en cada iteración aumenta considerablemente, haciendo prohibitiva su aplicación.

V. TRABAJOS FUTUROS

Este tipo de propuestas representan un avance en el estudio de métodos que disminuyen el espacio de solución en el problema de planeamiento de redes de transmisión, los cuales constituyen una herramienta que reduce el grado de complejidad y a su vez proporciona puntos de inicio de buena calidad para técnicas de solución robustas como son las técnicas metaheurísticas (Algoritmo genético, búsqueda tabú, colonia de hormigas, entre otras), permitiendo llegar más fácil y rápidamente a la solución óptima global del problema.

Es necesario dirigir un esfuerzo a la creación de mecanismos que permitan la identificación de componentes principales en sistemas de gran tamaño de manera rápida y eficaz. Aunque en este caso se trabajó con sistemas considerados pequeños o medianos, esta misma metodología se puede aplicar a sistemas de gran tamaño dividiendo el sistema eléctrico en varios sub-sistemas que pueden ser analizados individualmente y cuyas respuestas

pueden ser unificadas para el sistema eléctrico original. En un próximo trabajo se presentarán mecanismos desarrollados para realizar esta división de manera sistemática y coherente con la operación del sistema eléctrico y con los objetivos del planeamiento de la red de transmisión.

Otro tipo de propuesta que busca reducir el espacio de solución en el problema de planeamiento de redes de transmisión y en la que se trabaja actualmente es la aplicación de restricciones especializadas [13] para aplicar cortes que eliminan sub-espacios dentro del espacio de solución, reduciendo así el recorrido que debe realizar finalmente la técnica de solución principal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus sinceros agradecimientos al Grupo de Investigación en Planeamiento en Sistemas Eléctricos de la Universidad Tecnológica de Pereira por el apoyo conceptual y metodológico en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Latorre, G.; Cruz, R.D.; Areiza, J.M.; Villegas, A.; , "Classification of publications and models on transmission expansion planning," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.18, no.2, pp. 938- 946, Mayo 2003.
- [2] Escobar, L.M.; Duque, A.; Melchor, J.N.; Escobar, A.H.; "Planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica usando AMPL" *Scientia et Technica* [Online], Volumen 2 Número 51 (30 August 2012).
- [3] Escobar, A. H., "Planeamiento Dinámico de la Expansión de Sistemas de Transmisión Usando Algoritmos Combinatoriales.", Universidad Tecnológica de Pereira, tesis de Maestría, 2002.
- [4] Garver, L.L, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-89, pp. 1688 - 1697, Sept. 1970.
- [5] Escobar A.H., Gallego R.A., Romero R.A.: "Modelos Usados en el Planeamiento de la Expansión a Largo Plazo de Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica". Taller de publicaciones 1ª ed. Pereira (Colombia); Universidad Tecnológica de Pereira. 2010.
- [6] Gómez, G.A., "Algoritmos GRASP y Simulated Annealing Como Inicializadores de Branch and Bound en la Solución de Planeamiento Estático de Sistemas de Transmisión.", Universidad Tecnológica de Pereira, tesis de Maestría, 2008.

- [7] Sousa, A.S.; Asada, E.N.; “A heuristic method based on the branch and cut algorithm to the transmission system expansion planning problem”. Power and Energy Society General Meeting, p. 1–6, 2011
- [8] Dominguez A.H., “Planeamiento de la Expansión de Redes de Transmisión Basado en Cambio de Nivel de Tensión.”, Universidad Tecnológica de Pereira, tesis de Maestría, 2012.
- [9] Escobar A.H., Gallego R.A., Romero R.A.: “Aplicación de Algoritmos Heurísticos en la Construcción de la Población Inicial de Algoritmos Genéticos que Resuelven el Problema de Planeamiento de la Expansión de la Transmisión”. Revista de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Volumen 31 número 1, p. 127 - 143, 2011.
- [10] Haffner S.L.: “O Planejamento de Expansao dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo”, Tesis de Doctorado, FEEC Unicamp, Julio de 2000.
- [11] Duque, A. “Identificación de Variables Principales en el Problema de Planeamiento de Redes de Transmisión Usando Técnicas Heurísticas Basadas en Métodos de Programación Lineal Entera y No Lineal Entera.”, Universidad Tecnológica de Pereira, Proyecto de grado de Ingeniería Eléctrica, 2013.
- [12] Fourer R., Gay D.M., Kernighan B.W., “AMPL: A modeling Language for Mathematical Programming”. Second Ed. Brooks /Cole – Thomson Learning. 2003.
- [13] Sousa, A.S., Asada, E.N., “Uma Nova Abordagem Branch and Cut Aplicada ao Problema de Planeamento da Expansão de Redes de Transmissão de Grande Porte” *Sba Controle & Automação*. 2012, vol 23, n 1, p.108-119.