

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA PLANEAMIENTO DE LA TRANSMISIÓN CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA Y PROPUESTAS DE DIFERENTES CONDUCTORES

✉ ANDRÉS HERNANDO DOMÍNGUEZ CASTAÑO¹
ANTONIO HERNANDO ESCOBAR ZULUAGA²
RAMÓN ALFONSO GALLEGO RENDÓN³

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología de solución para resolver el problema de planeamiento estático de redes de transmisión de energía eléctrica, considerando incertidumbre en la demanda y selección de conductores en las líneas de transmisión que hacen parte de los nuevos corredores. Este problema de optimización se resuelve usando un algoritmo genético especializado que utiliza la lógica del algoritmo genético propuesto por Chu y Beasley, combinado con una técnica exacta. La metodología se prueba sobre el sistema eléctrico colombiano de 93 nodos y 155 líneas candidatas. Los resultados obtenidos mejoran la solución para el planeamiento estático del sistema eléctrico colombiano.

PALABRAS CLAVE: algoritmo genético; optimización; conductores de alta temperatura y baja dilatación; planeamiento de la transmisión; incertidumbre en la demanda.

SOLUTION METHODOLOGY FOR THE TRANSMISSION PLANNING CONSIDERING UNCERTAINTY IN DEMAND AND DIFFERENT CONDUCTOR PROPOSALS

ABSTRACT

This paper presents a methodology for solving the static planning problem in electrical energy transmission networks considering uncertainty in demand and conductor selection for the transmission lines that belong to the set of all new paths. The optimization problem is solved using a specialized genetic algorithm, which uses the logic of the genetic algorithm proposed by Chu and Beasley, combined with exact optimization. The testing bench for the proposed methodology was chosen to be the Colombian power system of 93 buses and 155 candidate lines. The results obtained enhance the traditional solution for the Colombian power system regarding the transmission network planning study.

- ¹ Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira. Estudiante de Doctorado en Ingeniería en Universidad Tecnológica de Pereira. Integrante grupo Planeamiento en Sistemas Eléctricos.
- ² Ingeniero eléctrico, MsC. en Ingeniería Eléctrica, PhD. en Ingeniería Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho. Profesor Titular Universidad Tecnológica de Pereira.
- ³ Especialista en Planeamiento Energético, Uniandes. MsC. en Potencia Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. PhD. en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Campinas, Brasil. Profesor Titular Universidad Tecnológica de Colombia.

✉ *Autor de correspondencia Domínguez-Castaño, A.H.*
(Andrés Hernando): Universidad Tecnológica de Pereira,
Carrera 27 N. 10-02 Barrio Alamos, Risaralda (Colombia).
AA: 97 / Código postal: 660003 / Tel: (576) 313 73 00 /
Correo electrónico: andreshdominguez@gmail.com

Historia del artículo:
Artículo recibido: 16-IV-2013 / Aprobado: 14-II-2014
Disponibile online: 12 de mayo 2014
Discusión abierta hasta mayo de 2015

KEYWORDS: Genetic Algorithm; Optimization; High Temperature Low Sag Conductor (HTLS); Transmission Planning; Uncertainty in Demand.

METODOLOGIA DE SOLUÇÃO PARA PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO INCERTEZA NA DEMANDA E PROPOSTAS DE DIFERENTES CONDUTORES.

RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma metodologia de solução para solucionar o problema de planejamento estático de redes de transmissão de energia elétrica, considerando incerteza na demanda e seleção de condutores nas linhas de transmissão que fazem parte dos novos corredores.

Este problema de otimização se soluciona usando um algoritmo genético especializado que usam a lógica do algoritmo genético proposto por Chu y Beasley, combinado com uma técnica exata. A metodologia se experimenta sobre o sistema elétrico colombiano de 93 nodos e 155 linhas candidatas. O resultados obtidos melhoram a solução para o planejamento estático do sistema elétrico colombiano.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo genético; Otimização; Condutores de alta temperatura e baixa dilatação; Planejamento da transmissão; incerteza na demanda.

1. INTRODUCCIÓN

El problema tradicional de planeamiento de la expansión de la red de transmisión de energía eléctrica determina las nuevas inversiones en líneas de transmisión y subestaciones de alta tensión AC, necesarias para permitir la transferencia adecuada de energía eléctrica entre los diferentes puntos de un sistema de potencia, tanto para la operación actual como para la operación futura. Las opciones asociadas a este problema se caracterizan por sus altos costos de inversión, sus largos periodos de construcción y sus largos tiempos de recuperación de la inversión. Los estudios de planeamiento toman como referencia la red actual y consideran el incremento de la demanda en los nodos del sistema, las alternativas de nueva generación y la repotenciación de generación existente, en un horizonte de tiempo que normalmente es de 10 o más años.

El planeamiento estático determina la solución de costo mínimo a partir del planteamiento de un problema de optimización matemática que considera que la red existente hace parte de la solución futura, es decir, no se considera la posibilidad de retirar, trasladar o dejar desconectados en forma permanente, elementos que se encuentran operando en la red

actual. También considera que un agente planeador ha establecido previamente los siguientes aspectos: 1) El crecimiento de la demanda en los nodos del sistema; 2) La localización y la cantidad de demanda de nodos nuevos; 3) La cantidad y localización de generación nueva; 4) La capacidad adicional de plantas de generación existentes que están siendo o van a ser repotenciadas; 5) La localización geográfica, el costo y las características eléctricas de los nuevos corredores de transmisión; 6) El costo asociado a circuitos adicionales que pueden conectarse en paralelo con circuitos ya establecidos en corredores existentes; 7) La localización, el tamaño y el costo de subestaciones nuevas; 8) Los niveles de tensión a los que operaran los corredores nuevos y existentes; y 9) Los niveles de tensión asociados a las subestaciones nuevas. Es importante aclarar que el planeamiento estático no aplica a sistemas con mercado de electricidad. En el caso de sistemas desregulados la metodología debe considerar aspectos asociados a acceso abierto, que no son considerados en este trabajo.

El problema de planeamiento de la expansión de redes de transmisión de energía eléctrica es un problema no lineal entero-mixto (PNLEM), y adicionalmente puede ser del tipo NP-completo. Este problema

ha mostrado ser un problema multimodal, no convexo, que no logra resolverse exitosamente utilizando técnicas de optimización exactas cuando el sistema es de gran tamaño y tiene una cantidad importante de nodos aislados. En sistemas de pequeño y mediano tamaño se encuentra la solución óptima usando métodos como *Branch and Cut* o *Branch and Bound* (Bahense *et al.*, 2001; Sousa y Asada, 2011). En estos casos se encuentra que los sistemas de cómputo requieren de grandes tiempos de cálculo si se les compara con los requeridos por técnicas metaheurísticas como Búsqueda Tabú (TS) o el algoritmo genético de Chu-Beasley, AGCB, (Beasley y Chu, 1997). Los problemas que son simultáneamente PNLEM y NP-completos se caracterizan por ser los de más difícil solución. El problema de planeamiento está conformado por funciones lineales y no lineales que incluyen variables continuas (desfase angular, flujo de potencia por las líneas, etc.) y variables enteras (número de líneas o transformadores nuevos que se deben adicionar a la red). En sistemas de la vida real puede incluir cientos o miles de variables y restricciones.

Para resolver el problema de planeamiento de la expansión, se han utilizado diversas metodologías de solución que van desde las técnicas heurísticas y los métodos exactos de PNLEM hasta las técnicas metaheurísticas. Una primera aproximación a la solución del problema de planeamiento fue realizada en Garver (1970), la cual se fundamenta en los principios de la programación lineal. Otras técnicas utilizadas se fundamentan en programación no lineal (Sanchez, *et al.*, 2005), técnicas heurísticas (Monticelli, *et al.*, 1982) y técnicas metaheurísticas (Gallego, 1997).

Puede encontrarse una revisión de las publicaciones y modelos que han sido utilizados para el problema de planeamiento en Latorre, Cruz y Areiza (2003) y Romero, García, y Haffner, (2002). En Sum-Im, *et al.* (2006), se encuentra un resumen de los tipos de planeamiento, y en Lee, *et al.* (2006), se presenta una clasificación de los algoritmos utilizados. En Escobar (2008) y en Hemmati, Hooshmand y Khodabakhshian (2013) también se presenta un resumen de los diversos trabajos realizados en el planeamiento de la transmisión.

En este trabajo se presenta una metodología de solución que se diferencia del modelo tradicionalmen-

te usado para resolver el problema de planeamiento estático de la expansión, en dos aspectos: 1) Permite seleccionar el conductor más apropiado, para los nuevos corredores de transmisión, y 2) Considera la incertidumbre en la demanda. El segundo aspecto está relacionado con el hecho de que en el planeamiento de largo plazo, la demanda futura se obtiene de un proceso de proyección de demanda que determina tres escenarios, uno pesimista, uno optimista y uno intermedio *determinístico*. El planeamiento tradicional utiliza el valor de demanda determinística, sin embargo, la demanda puede considerarse como una variable que puede asumir un valor en un rango que se define entre el escenario pesimista y el escenario optimista. Esta variabilidad puede ser aprovechada en el proceso de optimización, ya que la red futura de largo plazo puede considerarse adecuada si atiende a una demanda en cada barra del sistema que se encuentre dentro del rango de incertidumbre. Esta condición puede evitar inversiones de alto costo que se realizan para atender pequeños desvíos en demandas futuras inciertas y con muy bajas relaciones beneficio/costo. Algunos trabajos donde la demanda se considera como una variable del problema de planeamiento pueden encontrarse en Bolaños, Correa y Escobar (2008), Escobar, Romero y Gallego (2008), Silva, *et al.* (2005) y Silva, *et al.* (2006).

Además de la incertidumbre en la demanda, en este trabajo también se considera la selección del conductor más apropiado para cada corredor de transmisión nuevo. Se consideran entonces como variables: el calibre y la tecnología de construcción. La idea es beneficiarse de las nuevas tecnologías de fabricación de conductores para aumentar la capacidad de transmisión, de forma que se tenga un impacto positivo sobre la seguridad del sistema y se aprovechen las economías de escala que aparecen al utilizarse conductores de mayor capacidad sobre estructuras similares a las usadas por los conductores tradicionales en el plan de inversión.

En la técnica de solución se utiliza un algoritmo genético de Chu-Beasley, que en su codificación utiliza un cromosoma con dos componentes. El primer componente del cromosoma define *qué, dónde y cuántas* adiciones deben hacerse; y el segundo componente selecciona, para el caso de corredores de transmisión

nuevos, el conductor que se debe utilizar para cada línea del sistema. La solución obtenida al realizar el proceso de optimización debe garantizar la operación adecuada en un escenario generación-demanda futuro de largo plazo.

En este trabajo se toma como referencia el sistema de transmisión colombiano de 93 nodos y 155 corredores, el cual se modifica para que considere la inclusión de conductores de alta temperatura y baja dilatación (HTLS) en las propuestas de inversión de los nuevos corredores de transmisión. Además se considera una incertidumbre del $\pm 5\%$ en la demanda

determinística. Los resultados obtenidos producen un beneficio económico relevante en costos de inversión.

2. MODELO DEL PROBLEMA DE PLANEAMIENTO

A continuación se presenta el modelo matemático usado para resolver el problema de planeamiento estático de la transmisión con incertidumbre en la demanda y propuestas de conductores de diferente calibre y tecnología. Este último se deriva del modelo DC (Escobar, Gallego y Romero, 2010), el cual es considerado ideal cuando se hacen trabajos de planeamiento de la transmisión a largo plazo.

$$\begin{aligned}
 \min &= \sum_{(i,j) \in \Omega_2} C_{ij} n_{ij} + \sum_{(i,j) \in \Omega_3} C_{ij}'' n_{ij}'' + \alpha \sum_{i \in \Omega_1} r_i + \beta \sum_{i \in \Omega_1} |d_i - d_{i0}| \\
 \text{s.a.} & \\
 S^0 f^0 + S' f' + g + r - d &= 0 \\
 f_{ij}^0 - (\theta_i - \theta_j)(n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} &= 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_2 \\
 f_{ij,k}' - (\theta_i - \theta_j) n_{ij,k}' \gamma_{ij,k}' y_{ij,k} &= 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_3, k = 1, \dots, nk \\
 \sum_{k=1}^{nk} y_{ij,k} &= 1 \quad \forall (i, j) \in \Omega_3 \\
 n_{ij}'' &= \sum_{k=1}^{nk} n_{ij,k}' y_{ij,k}; \quad C_{ij}'' = \sum_{k=1}^{nk} C_{ij,k}' y_{ij,k} \\
 f_{ij}' &= \sum_{k=1}^{nk} f_{ij,k}' \\
 |\theta_i - \theta_j| &\leq \frac{\overline{f_{ij}}}{\gamma_{ij}} \quad \forall (i, j) \in \Omega_2 \\
 |\theta_i - \theta_j| &\leq \min \left\{ \left(\frac{\overline{f_{ij,1}}}{\gamma_{ij,1}} + M(1 - y_{ij,1}) \right), \dots, \left(\frac{\overline{f_{ij,nk}}}{\gamma_{ij,nk}} + M(1 - y_{ij,nk}) \right) \right\} \quad \forall (i, j) \in \Omega_3 \\
 0 &\leq g \leq \overline{g} \\
 d_{\min} &\leq d \leq d_{\max} \\
 0 &\leq n_{ij} + n_{ij}^0 \leq \overline{n_{ij}} \\
 0 &\leq n_{ij}'' \leq \overline{n_{ij}} \\
 0 &\leq r \leq \overline{r} \\
 y_{ij,k} &\in \{0, 1\}, \quad \{n_{ij}, n_{ij}^0, n_{ij,k}', n_{ij}''\} \text{ Entero, } \{\gamma_{ij}, \gamma_{ij,k}'\} \text{ Discreto, } \{f_{ij}^0, f_{ij,k}', g_i, \theta_j\} \text{ Irrestringido}
 \end{aligned} \tag{1}$$

En el modelo anterior, C_{ij} es el costo de adicionar un circuito en la rama $i-j$ en un corredor existente; $C'_{ij,k}$ es el costo de adicionar un circuito con conductor tipo k , en la rama $i-j$ en un corredor nuevo; C''_{ij} es el costo de adicionar un circuito en la rama $i-j$, en un corredor nuevo; Ω_2 y Ω_3 representan el conjunto de los corredores de transmisión existentes y nuevos, respectivamente; Ω_1 es el conjunto de nodos con carga; α es un parámetro de penalización asociado a la potencia no servida; β es un parámetro de penalización asociado al desvío de la demanda atendida respecto a la demanda determinística; r es el vector de generadores artificiales; d_{i0} es la demanda determinística en el nodo i ; d_i es el valor de demanda atendida en el nodo i , y se debe encontrar entre $\pm 5\%$ respecto a d_{i0} ; S^0 y S' son matrices de incidencia nodo-rama del sistema eléctrico en la red base y red nueva respectivamente; f^0 y f' son vectores de flujo cuyos elementos representan el flujo total en el camino $i-j$ en la red base (f_{ij}^0) y en la red nueva (f'_{ij}) para un conductor tipo k , g es el vector de generaciones nodales, d es el vector de demandas nodales, γ_{ij} y $\gamma'_{ij,k}$ son las susceptancias de cada circuito en el corredor $i-j$ en la red base y en la red nueva, para el tipo de conductor k ; θ es el vector de ángulos nodales; \bar{f}_{ij} y $\bar{f}'_{ij,k}$ son el flujo máximo permitido para un circuito en el camino $i-j$ en un corredor existente y en un corredor nuevo que usa el conductor tipo k , respectivamente; \bar{g} es el vector de máxima generación nodal; d_{min} un vector que contiene la demanda mínima que se debe suministrar en cada nodo, d_{max} un vector que contiene la demanda máxima que se debe suministrar en cada nodo; n_{ij}^0 es el número de refuerzos adicionados en la rama $i-j$ de la red base; $n'_{ij,k}$ es el número máximo de circuitos que se pueden adicionar en la rama $i-j$; n_{ij} es el número de circuitos existentes en la rama $i-j$ de la red base; \bar{n}'_{ij} es el número de circuitos adicionados en la rama $i-j$ usando el tipo de conductor k ; y $y_{ij,k}$ es una variable binaria que permite seleccionar o no el conductor tipo k para el corredor nuevo ij . La función objetivo está compuesta por cuatro términos: el primero representa la suma de los costos de los refuerzos adicionados a los corredores existentes, el segundo término representa la suma de los costos de los elementos adicionados en los corredores nuevos y el tercer y cuarto término representan la penalización del racionamiento y del desvío de la demanda respecto al valor *determinístico*. En el modelo se deben hacer las siguientes aclaraciones: 1) M es un parámetro de gran tamaño que permite relacionar la abertura angular

máxima permitida en los corredores de transmisión nuevos, con la susceptancia y la capacidad máxima del conductor tipo k seleccionado; 2) El grupo de restricciones $f'_{ij,k} - (\theta_i - \theta_j)n'_{ij,k}\gamma'_{ij,k}y_{ij,k} = 0$, representan la segunda ley de Kirchhoff aplicada al conjunto de reactancias de cada corredor de transmisión nuevo, conectadas entre los nodos $i-j$ y que usan el conductor del tipo k . Si el conductor tipo k está seleccionado, el valor $y_{ij,k}=1$, y el flujo de potencia por el corredor nuevo ij queda relacionado con la abertura angular y la susceptancia del conductor tipo k . Si $y_{ij,k}=0$, el flujo $f'_{ij,k}$, es cero; 3) La restricción $\sum_{k=1}^{nk} y_{ij,k} = 1$ garantiza que para cada corredor de transmisión nuevo $i-j$, sólo pueda seleccionarse un solo tipo de conductor k de los nk posibles; 4) Existen dos tipos de restricciones de abertura angular. La primera se aplica a los corredores de la red existente y tiene la forma tradicional. La segunda se aplica únicamente a los corredores nuevos y contiene el término $M(1-y_{ij,k})$, que para $y_{ij,k}=1$ genera la restricción $|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{f}_{ij,k} / \gamma'_{ij,k}$ para el corredor $i-j$ y el conductor tipo k seleccionado. 5) El sistema de **Ecuaciones (1)** no considera modificar el tipo de conductor en los corredores de la red existente y considera incertidumbre en la demanda en todos los nodos de carga.

3. CONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA Y BAJA DILATACIÓN

Los conductores de alta temperatura y baja dilatación, denominados HTLS (*High Temperature Low Sag*), poseen más capacidad de corriente que los conductores convencionales y pueden operar a altas temperaturas con bajas tasas de dilatación térmica, lo que les permite transportar mayor potencia conservando las distancias de seguridad entre los conductores y los elementos circundantes a la línea de transmisión a lo largo del vano (vegetación, etc) (Thrash, 2001; Baker, 2001; Zamora, *et al.*, 2001; Mateescu, *et al.*, 2011; Chasipanta, 2012). Constan de un núcleo que puede ser de acero, aleación de acero, o un material compuesto rodeado por múltiples capas de aluminio o aleación de aluminio. A diferencia de los conductores convencionales, las propiedades de las capas de aluminio son mecánica y eléctricamente estables a temperaturas entre 200 y 250 grados centígrados. Con respecto a los conductores convencionales ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) de igual diámetro externo,

Tabla 1. Costo de conductores HTLS, instalación y accesorios, respecto al ACSR.

Conductor	ACSR	ACSS	GZTACSR	ZTACIR	ACCC	ACCR
Costo relativo	1	1,1-1,5	2	3,5	5-7	10

estos conductores aumentan la capacidad de corriente en un factor comprendido entre 1,4 y 2 veces. Entre los conductores HTLS, se encuentran los siguientes:

a. ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported).

Está formado por hilos de aluminio trenzados alrededor de un núcleo de acero de extra alta tensión mecánica. Es simple de instalar, sin embargo se debe tener mas cuidado en su instalación por tener aluminio recocido. La temperatura de operación es cercana a los 200 °C y en los casos en que el núcleo está recubierto con una capa de aluminio puede alcanzar los 260 °C. Galvanizado puede operar a 245 °C. El método de tendido es el mismo que para los conductores ACSR y la posibilidad de que el conductor falle por fatiga es baja. El ACSS se encuentra dentro de los estándares ASTM (*American Society for Testing and Materials*) B856 y B857.

b. (Z)TACIR (Super-Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Invar Reinforced).

Su construcción es similar al ACSR. Presentan un núcleo constituido por hilos de aleación de Invar (acero con un 36-38 % de Níquel, componente que le aporta un coeficiente de dilatación muy bajo). El núcleo esta rodeado de (Z)TAL, una aleación de zirconio aluminio, que resiste temperaturas hasta 200 °C. La instalación del (Z)TACIR es igual que para un conductor convencional ACSR.

c. G(Z)TACSR (Gap-type Super-Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Steel Reinforced).

Este conductor tiene núcleo de acero normal, sin embargo en su instalación el acero soporta toda la tensión. Se requiere de un procedimiento y equipo especial de instalación. De otro lado, no se recomienda su instalación en regiones que producen altas cargas de hielo.

d. ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced).

Está formado por hilos de aleación aluminio-zirconio resistente a la temperatura, que permite operaciones continuas a 210 °C y regímenes

de emergencia de hasta 240 °C. El núcleo es reforzado por fibras de cerámica que se encuentran entre una matriz de filamentos de aluminio puro para mejorar la conductividad. El conductor ACCR se encuentra certificado por el estándar ASTM B976. El método de instalación es similar al convencional, y debe tenerse cuidado de no doblar y romper las fibras de cerámica. El tiempo de instalación es 10 % superior el convencional.

e. ACCC (Aluminum Conductor Composite Core).

Está formado por un núcleo con fibras de carbono y un recubrimiento de aluminio. Los conductores ACCC usan la tecnología de aluminio recocido a alta temperatura. Su núcleo es 25 % más fuerte que el acero y 60 % más liviano, esto permite aumentar el contenido de aluminio en más del 25 %, sin aumentar su diámetro ni su peso. También tiene mayor coeficiente de rugosidad de la superficie del conductor y menores pérdidas por efecto corona. Bajo condiciones normales (hasta 200°C) no se produce deformación plástica.

En la **Tabla 1** se presenta la relación de costos de los conductores HTLS, sus accesorios y su instalación, respecto a los del conductor convencional ACSR (Mateescu, *et al.*, 2011).

4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

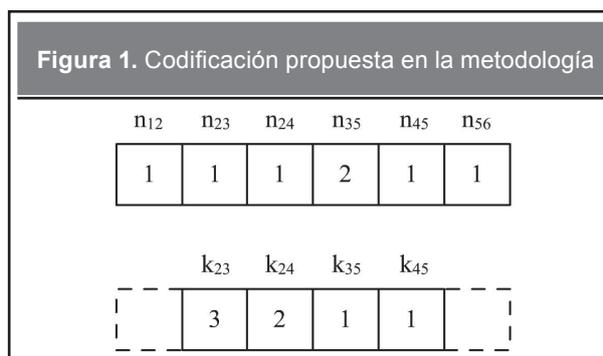
En esta propuesta la técnica de optimización matemática evalúa un espacio de soluciones de mayor tamaño que el que se evalúa en el planeamiento tradicional, ya que para cada circuito candidato considera diferentes tipos de conductores, y selecciona aquellos que minimizan el costo de inversión global para un escenario de generación futuro. Además se considera un porcentaje de desviación en la demanda de cada uno de los nodos del sistema para la proyección de demanda futura. De esta forma es posible atender mayor o menor cantidad de demanda en cada uno

de los nodos del sistema, según más le convenga al proceso de minimización de costo.

En el planeamiento tradicional, los entes encargados del planeamiento establecen *a priori* la demanda esperada futura y el tipo de conductor a utilizar en cada corredor nuevo, lo que puede conducir a soluciones subóptimas. En este trabajo se considera que la demanda puede variar hasta un 5 % por debajo (límite inferior) y por encima (límite superior) del valor *determinístico*. De esta forma el proceso de optimización selecciona los valores de demanda que debe atender entre estos valores mínimos y máximos teniendo en cuenta la configuración de la red y la función objetivo. Un aspecto que resulta relevante es que existen conductores HTLS con capacidad de transporte mayor pero con diámetro similar a los ACSR, y que pueden usar las mismas estructuras y la mayoría de los accesorios requeridos para el montaje de los conductores tipo ACSR. Bajo estas condiciones, el sobre costo fundamentalmente afecta al conductor, que es una fracción del costo total del corredor, lo que produce factores de sobre costo bajos cuando se comparan los costos totales de inversión por circuito para las diferentes opciones en los corredores.

En un proyecto nuevo, aproximadamente el 30 % del costo total de una línea de transmisión está asociado al conductor. Esto implica que al aumentar el costo del conductor en 1,5 veces (ACSS vs ACSR), el costo total de la línea se aumenta aproximadamente en 1,15 veces. El incremento en el costo resulta inferior al aumento en la capacidad de transmisión del circuito, que para el conductor ACSS es de 1,8 veces la del ACSR. En consecuencia, existe un beneficio neto que favorece la utilización de estos conductores. También resulta interesante en aquellos casos en que un solo circuito con conductores tipo HTLS permite transportar la potencia que transportan dos circuitos con conductores convencionales. La determinación de usar o no conductores HTLS se deja a un proceso de optimización, donde se consideran diversas propuestas de conductores para cada tramo de red.

Para considerar el remplazo de un conductor convencional por un conductor HTLS, se deben cumplir las siguientes condiciones: 1) Para un tramo de red dado, el conductor HTLS debe presentar una dilata-



ción a alta temperatura menor o igual a la dilatación que presenta un conductor convencional operando a menor temperatura. 2) La tensión mecánica horizontal máxima no debe exceder la del conductor convencional en más del 10 %. (Para evitar modificaciones en estructuras y cimientos). 3) El conductor HTLS debe tener un coeficiente de amortiguamiento mecánico alto. 4) El diámetro debe ser igual o menor al del conductor convencional (para evitar modificaciones en estructuras y otros elementos de la red). 5) Debe tener la misma o menor resistencia eléctrica para no afectar significativamente las pérdidas eléctricas.

El uso de conductores HTLS incentiva la investigación en el problema de planeamiento de la expansión de redes de transmisión de energía eléctrica, debido a las economías de escala que pueden ser aprovechadas con su uso. En 1998 el CIGRE (*international council on large electric systems*) realizó una encuesta sobre los conductores utilizados en algunos países, con el propósito de proyectar la capacidad de las redes hacia el futuro. Los resultados de la encuesta muestran que la mayor parte de las redes, cerca del 82 %, están construidas con conductores ACSR (CIGRE, 1998). Resulta entonces interesante indagar sobre la conveniencia de considerar los conductores HTLS dentro de las alternativas de inversión futuras.

En este trabajo el proceso de optimización que selecciona el mejor subconjunto de transformadores, líneas de transmisión y tipo de conductor es un algoritmo genético especializado de Chu-Beasley (AGCB). A continuación se describirá cada una de las partes que lo conforman:

a) Codificación. El cromosoma de decisión tiene dos componentes. En el primer componente, el AGBC especializado debe decidir la adición de

circuitos tanto en corredores nuevos como en los existentes. En el segundo componente, en el caso de corredores nuevos, debe decidir el tipo de conductor para su operación. En la **Figura 1** se presenta el esquema de codificación utilizado.

En la **Figura 1**, n_{12} y n_{56} son adiciones en subestaciones. n_{23} , n_{24} , n_{35} y n_{45} son adiciones en líneas de transmisión de corredores nuevos. k_{ij} define el tipo de conductor propuesto para las líneas de transmisión. Por ejemplo, en la línea 2-3 se selecciona el conductor tipo 3 ($k_{23}=3$), en la línea 2-4 se selecciona el conductor tipo 2 ($k_{24}=2$), en la línea 3-5 se selecciona el conductor tipo 1 ($k_{35}=1$) y en la línea 4-5 se selecciona el conductor tipo 1 ($k_{45}=1$). En la base de datos está relacionado cada tipo de conductor con sus datos específicos. En un corredor de transmisión existente, sólo se permite colocar refuerzos usando el mismo tipo de conductor que posee dicho corredor.

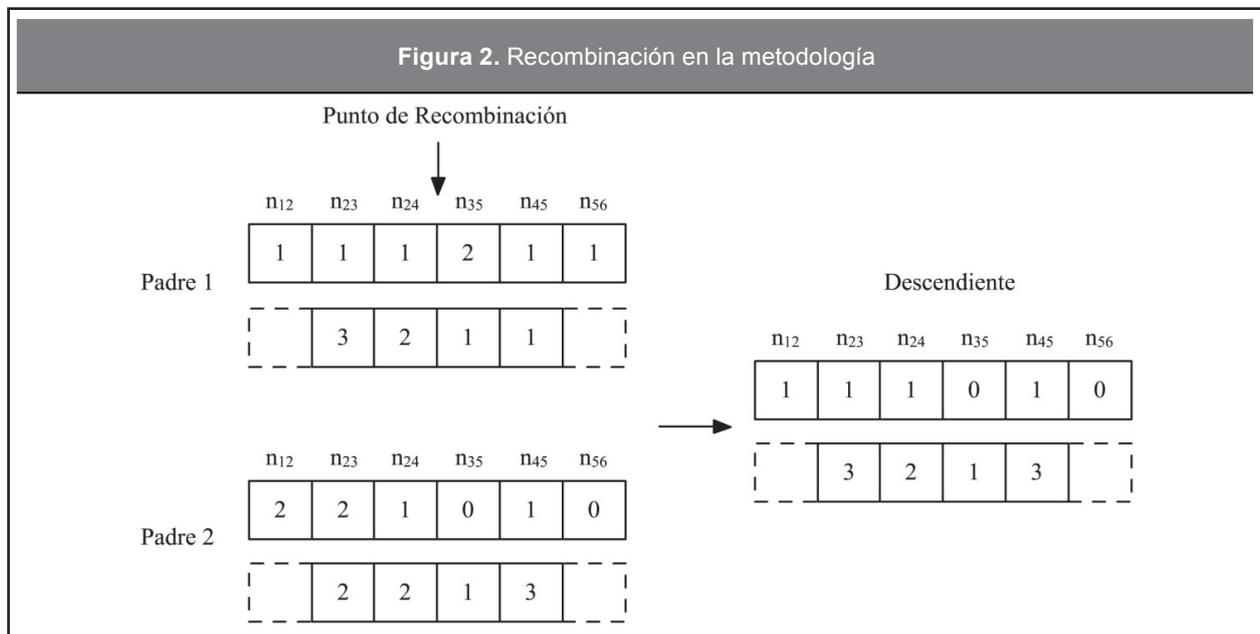
b) Población inicial. La población inicial de los algoritmos genéticos generalmente se construye de forma aleatoria lo que la mayoría de las veces aumenta el esfuerzo computacional y requiere de más tiempo para encontrar soluciones aceptables. Este problema puede ser mejorado con poblaciones construidas de forma heurística o aleatoria controlada, incluyendo uno o varios criterios de sensibilidad. Un resumen de las técnicas más usuales para construir la población inicial

puede encontrarse en Escobar, Gallego y Romero (2011). Pruebas experimentales han mostrado que al construir una parte de la población con técnicas heurísticas constructivas y la otra parte de forma aleatoria controlada se mejora el desempeño del proceso de optimización.

c) Criterio de diversidad. Se debe cumplir durante todo el proceso de optimización del AGCB que entre los individuos de la población exista una distancia de separación para garantizar la heterogeneidad en la población. La ventaja de este criterio es que asegura una mejor exploración del espacio de solución y previene la convergencia prematura, común en el algoritmo genético tradicional.

d) Operador de selección. En el AGCB el proceso de selección se realiza aplicando el método de *torneo*. La técnica selecciona k participantes, donde k varía entre 2 y 4. El proceso es como sigue: se seleccionan aleatoriamente k individuos de la población, de allí se selecciona el que tenga la mejor función objetivo, calificándose como primer padre. Luego se repite el proceso para encontrar el segundo padre, garantizando en el proceso que ambos padres sean distintos. Después los padres pasan a la fase de recombinación.

e) Operador de recombinación. En este trabajo se aplica recombinación de un punto. Para esto se selecciona aleatoriamente un número p entre uno y el número de corredores de transmisión



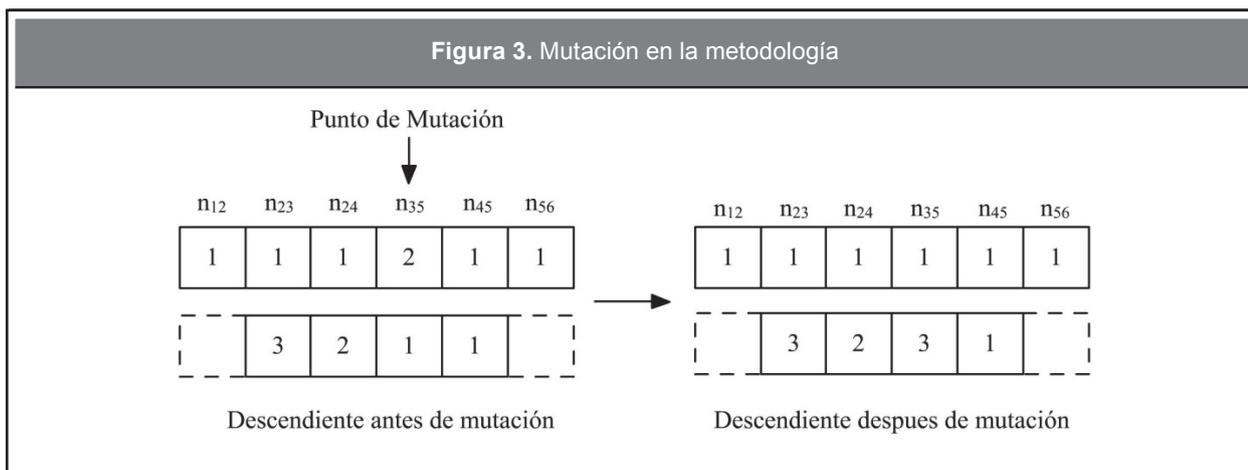
menos uno. En el ejemplo de la **Figura 2**, se selecciona un número entre 1 y 5. Para conformar el descendiente, se toman los contenidos de los primeros p corredores del padre 1 y los últimos $(n-p)$ elementos del padre 2. Dado que a cada corredor nuevo, asociado a una línea de transmisión, le corresponde un tipo de conductor k , el tipo siempre acompaña al corredor en el proceso de intercambio.

f) Operador de mutación. La mutación en el AGCB se ejerce en un solo individuo, definiéndose como la alteración de 1 o más genes del vector decisión (descendiente obtenido del proceso de recombinación) de acuerdo al porcentaje o tasa de mutación. En el planeamiento de la transmisión la mutación se hace de acuerdo a la tasa que se fije de mutación, y la modificación en el gen seleccionado depende del corte de carga. Se define un límite máximo de corte de carga ($maxcor$), luego si la propuesta tiene un corte de carga mayor al límite máximo, se dará desde la probabilidad más prioridad a adicionar circuitos que a remover. Además, tendrá la posibilidad de mutar el tipo de conductor k_{ij} de forma aleatoria. En la **Figura 3** se muestra un ejemplo del operador de mutación cuando el corte de carga en la propuesta de inversión es menor a $maxcor$.

g) Mejoramiento local de un individuo. En el planeamiento de la transmisión, luego de la etapa de mutación, el descendiente puede ser sometido a un análisis especial en el que puede mejorarse su función objetivo y/o disminuir su infactibilidad. Se usan dos etapas de mejoramiento. La primera etapa utiliza análisis de sensibilidad, para este propósito se utiliza una técnica heurística constructiva basada en

la propuesta de Villasana-Garver-Salon (Villasana, Garver y Salon, 1985). El indicador de sensibilidad puede identificar varias adiciones que resultan interesantes para mejorar la solución y entre ellas se selecciona una, que puede ser la mejor, para agregar un circuito. La segunda etapa se basa en la identificación de circuitos redundantes, es decir, elementos que al ser removidos reducen el costo de inversión pero no alteran la factibilidad del problema. Para esto se resuelve sucesivamente la propuesta actual eliminando cada vez un circuito adicionado. El proceso de retiro de líneas de transmisión se realiza en orden de mayor a menor costo, y sólo se considera retirar un circuito cada vez, de cada corredor.

h) Modificación de la población. En la etapa final, un descendiente que cumple diversidad (descendiente diferente a todos los individuos de la población) puede reemplazar un individuo de la población actual en los siguientes casos. 1) El descendiente es infactible y en la población existen individuos infactibles con mayor infactibilidad. En este caso el descendiente reemplaza al individuo más infactible de la población. 2) El descendiente es factible y en la población existen individuos infactibles. En este caso se reemplaza al individuo más infactible de la población. 3) El descendiente es factible y en la población solo existen individuos factibles, algunos de peor calidad que el descendiente. En este caso el descendiente reemplaza al individuo con peor función objetivo. Para todos los casos, si el descendiente tiene mejor función objetivo que el mejor de la población (incumbente) y no cumple diversidad se usa el criterio de aspiración. El criterio de aspiración permite sustituir



aquel individuo (descendiente) por el individuo calificado como mejor solución del proceso en dicho instante (incumbente), además deben ser eliminados todos los individuos de la población que no satisfagan diversidad con el nuevo individuo (descendiente). Luego, en las siguientes generaciones debe completarse de nuevo la población con nuevos individuos, producto de las etapas de selección, recombinación, mejoría local y mutación.

5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos. Se usa como referencia el sistema eléctrico colombiano de 93 nodos y 155 líneas candidatas. Como alternativa de inversión a los tradicionales conductores ACSR, se proponen conductores HTLS del tipo denominado ACSS, en los corredores nuevos. Aunque se propone solo un tipo de conductor adicional, pueden ser propuestos más tipos de conductor. Los datos del sistema colombiano pueden encontrarse en Escobar (2002). A partir de este sistema se proponen conductores ACSS para los corredores nuevos de la red de transmisión de 500kV y 230kV. Los datos asociados a los conductores ACSS pueden ser consultados con los autores. Con respecto a la incertidumbre en la demanda, se utiliza un valor de $\pm 5\%$ en cada nodo para delimitar un valor mínimo y máximo con base en el valor *determinístico*.

El problema de planeamiento del sistema de transmisión se resuelve implementando los procedimientos descritos anteriormente en un programa de computador escrito en FORTRAN. De otro lado, los conductores típicos en Colombia para la red de transmisión son del tipo ACSR (cerca del 80 %) y AAAC (*All Aluminum Alloy Conductor*) (cerca del 8 %) (Mejía, 2008). En Infocables (2007) se encuentra que el costo para el ACSR y el AAAC es aproximadamente el mismo, cuando se comparan conductores de calibre equivalente (mismo diámetro).

En este trabajo, para el conductor ACSS se considera un costo de 1,5 veces respecto al costo de un conductor ACSR (peor escenario). Por otro lado, de acuerdo con la capacidad de potencia del conductor ACSS, se tiene que para conductores en el nivel de 230 kV el aumento es aproximadamente el 84 % respecto al original, y para conductores en el nivel de 500kV el aumento en capacidad es

aproximadamente el 80 % respecto al original. Sin embargo en este trabajo se limita la capacidad de transporte de potencia al 69 % y 65 % en circuitos con conductor ACSS de 230kV y 500kV respectivamente, para tener un beneficio adicional en la seguridad eléctrica durante la operación y para reducir las pérdidas de potencia.

5.1 Solución de referencia: sistema colombiano tradicional

Se toma como referencia la mejor solución conocida para este sistema de US\$ 560,002 millones de dólares y corte de carga de 0,38 MW, reportada en Escobar (2002), encontrada por el planeamiento tradicional y conformada por los siguientes circuitos:

$$n_{43-88}=2, n_{15-18}=1, n_{30-65}=1, n_{30-72}=1, n_{55-57}=1, n_{55-84}=1, n_{56-57}=1, n_{55-62}=1, n_{27-29}=1, n_{29-64}=1, n_{50-54}=1, n_{62-73}=1, n_{54-56}=1, n_{72-73}=1, n_{19-82}=2, n_{82-85}=1, \text{ y } n_{68-86}=1.$$

En la solución anterior, n_{ij} corresponde al número de adiciones en el corredor $i-j$. La codificación usada en este caso selecciona las inversiones necesarias en líneas de transmisión y transformadores sin incluir el tipo de conductor de las líneas como variable. Esta solución se denominará solución A.

5.2 Solución utilizando la red del sistema colombiano tradicional e incertidumbre en la demanda

En este trabajo se encuentra la solución para la red del sistema colombiano tradicional, es decir, sin propuestas de conductores HTLS con el algoritmo genético implementado y considerando incertidumbre en la demanda. La mejor solución encontrada fue de US\$ 295,665 millones de dólares sin corte de carga, y será denominada solución B. esta solución está conformada por los siguientes circuitos:

$$n_{43-88}=1, n_{73-82}=1, n_{55-84}=1, n_{27-64}=1, n_{19-82}=2, n_{82-85}=1, \text{ y } n_{68-86}=1$$

En la solución anterior, n_{ij} corresponde al número de adiciones en el corredor $i-j$. La demanda atendida total es de 13.950,6 MW representando el 95,82 % de la demanda media esperada o determinística total que tiene un valor de 14.559 MW. De otro lado la codificación

Tabla 2. Comparación entre las soluciones A, B y C.

US\$ 560,002	US\$ 295,665	US\$ 294,031
43-88 =2	43-88 =1	43-88/ACSS=1
55-84=1	55-84=1	55-84=1
19-82=2	19-82=2	19-82=2
82-85=1	82-85=1	82-85=1
68-86=1	68-86=1	68-86=1
15-18=1	--	15-18=1
--	27-64=1	27-64=1
--	--	19-66=1
--	--	62-73=1
--	73-82=1	--
30-65=1; 50-54=1	--	--
30-72=1; 62-73=1	--	--
55-57=1; 54-56=1	--	--
56-57=1; 72-73=1	--	--
55-62=1; 27-29=1	--	--
29-64=1	--	--

usada en este caso selecciona las inversiones necesarias en líneas de transmisión y transformadores sin incluir el tipo de conductor de las líneas como variable.

La solución B encontrada disminuye el costo a un 52,7 % de la solución A, y atiende una demanda igual al 95,82 % de la demanda determinística. Esto se explica por el hecho de que la solución B elimina inversiones de baja relación beneficio/costo que elevan mucho el costo de inversión y producen muy poco impacto en la demanda atendida.

5.3 Solución del sistema colombiano con incertidumbre en la demanda y propuestas de conductores ACSS

Se utiliza la opción del conductor ACSS con costo de 1,5 veces el convencional (ACSR) e incertidumbre en la demanda. El AGCB encuentra dos soluciones del mismo costo y atendiendo un valor de demanda diferente. La solución encontrada tiene un costo de US\$ 294,031 millones de dólares, denominada ahora en adelante solución C. En una primera solución con corte de carga de 0,7 MW y atendiendo 13.935,62 MW representando el 95,72 % de la demanda media esperada total. En la segunda solución sin corte de carga atendiendo un valor de 13.887,58 MW represen-

tando el 95,38 % de la demanda media esperada total. Las adiciones requeridas en la red cuando se utiliza la opción de conductores ACSS son:

$$n_{15-18} = 1, n_{55-84} = 1, n_{27-64} = 1, n_{19-66} = 1, n_{62-73} = 1, n_{19-82} = 2, n_{82-85} = 1, n_{68-86} = 1, n_{43-88/ACSS} = 1$$

En la anterior solución, n_{ij} es la adición de un circuito en el camino $i-j$ y $n_{ij/ACSS}$ representa la adición de un circuito en el camino $i-j$ del tipo ACSS.

La solución obtenida (C) con conductores ACSS mejora la solución B en US\$ 1,634 millones de dólares. Y mejora la solución A en US\$ 265,971 millones de dólares.

Los parámetros usados en el AGCB fueron: tasa de mutación entre el 3 y 5 %, tamaño de la población entre 10 y 40 individuos y factor de diversidad de un gen de diferencia entre los individuos de la población del algoritmo genético. De otro lado, durante la etapa de cálculo de parámetros del algoritmo genético se encuentran soluciones subóptimas alternativas, resultado de unas pocas generaciones que no requieren mayor tiempo computacional. Estas soluciones son usadas para generar nuevos puntos de inicio.

En la **Tabla 2** se muestra la diferencia entre las soluciones A, B y C. El símbolo «--» significa que el circuito no aparece en la solución. Allí se puede observar la diferencia entre las soluciones y que circuitos tienen en común. La baja diferencia entre las soluciones B y C se explica por el hecho de que tanto la incertidumbre como el uso de conductores HTLS persiguen el mismo objetivo: eliminar las inversiones de alto costo asociadas a bajas relaciones beneficio/costo. En consecuencia, una parte importante de las inversiones que se reducen por el uso de conductores HTLS ya habían sido descartadas por la solución que sólo considera la incertidumbre en la demanda.

Las soluciones obtenidas muestran que al considerar más variables en el problema de planeamiento de la transmisión puede disminuirse el costo de inversión para un horizonte de tiempo establecido. En el caso del sistema colombiano con incertidumbre en la demanda (B) se obtiene un costo igual al 52,7 % de la inversión de la solución usando planeamiento tradicional. De otro lado cuando se consideran conductores ACSS e

incertidumbre en la demanda (C) el costo representa el 52,5 % del costo tradicional.

Se encuentra que las soluciones encontradas en B y C, reutilizan circuitos de la solución tradicional (A) y evitan varias inversiones con baja relación beneficio/costo y que se usan para eliminar pequeños racionamientos en los nodos de carga, racionamientos que se encuentran dentro del rango de incertidumbre de la demanda.

El proceso de optimización decide cambiar la adición 73-82 presente en la solución B, por la propuesta del circuito 43-88 en ACSS, y la adición de un circuito en 15-18, 19-66 y 62-73 para disminuir el costo de la red en US\$ 1,634 millones de dólares. De ahí la importancia de proponer conductores con nueva tecnología.

Las soluciones encontradas deben someterse a otros análisis, como de seguridad (contingencia $n-1$), ya que algunos circuitos removidos pueden resultar relevantes para obtener un sistema más confiable. Además pueden ser considerados aspectos de mercado de electricidad. Este tipo de estudios serán considerados en investigaciones futuras.

6. CONCLUSIONES

Considerar la tecnología de los conductores que se utilizan en la red de transmisión futura permite reducir el costo de inversión, en el caso del problema de planeamiento estático. El conductor HTLS analizado resulta más competitivo, en términos de costos de inversión, que los conductores tradicionales ACSR, en algunos tramos de red que requieren nuevos circuitos.

Incluir incertidumbre en la demanda permite el planeamiento de redes de menor costo ya que puede aprovecharse la incertidumbre asociada a la proyección de demanda futura y realizar adiciones asumiendo que en el futuro puede aparecer, de forma *equiprobable*, cualquier demanda contenida en el cono de incertidumbre.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Colciencias y al grupo de planeamiento de la Universidad Tecnológica

de Pereira por el soporte y apoyo suministrado para la realización del presente proyecto.

REFERENCIAS

- Bahiense, L., et al., (2001). A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 16(3), pp.560-565.
- Baker, G.C. (2001). Reconductoring Power Lines- an Example Exercise in Conductor Selection. *Rural Electric Power Conference*, abril, pp.D1/1-D1/6.
- Beasley, J. y Chu, P. (1997). A Genetic Algorithm for the Generalized Assignment Problem. *Computers Operations Research*, 24(1), pp. 17-23.
- Bolaños, R. A., Correa, C. A., Escobar A. H. (2008). Planeamiento de la expansión de la transmisión considerando incertidumbre en la demanda y reprogramación de la generación. *Revista Scientia Et Technica*, XIV(40), diciembre, pp. 13-18.
- CIGRE, (1998). Survey on Future Use of Conductors. [En línea] Disponible en: <<http://www.nexans.us/US/2008/SurveyOnFutureUseOfConductors.pdf>>. [Consultado el día 19 de octubre de 2012].
- Chasipanta J. A.; Canelos R. A. (2012). Estudio para repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulaló a 138 kV utilizando el conductor más económico. Memorias de jornadas de ingeniería eléctrica y electrónica, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional [en línea]: Disponible en: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4902>>. [Consultado 01 noviembre de 2012].
- Escobar, A. H. (2002). *Planeamiento dinámico de la expansión de sistemas de transmisión usando algoritmos combinatoriales*. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
- Escobar, A. H. (2008). *Análise crítica de aspectos de modelagem matemática no planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão*. Tesis Doctoral. Universidad Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Ilha Solteira.
- Escobar, A. H.; Romero, R. A.; Gallego, R.A. (2008). Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Generation and Demand. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, IEEE/PES, (agosto), pp.1-6.
- Escobar, A. H.; Gallego, R. A.; Romero, R. A. (2010). *Modelos usados en el planeamiento de la expansión a largo plazo de sistemas de transmisión de energía*

- eléctrica. Risaralda, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Escobar, A. H., Gallego, R. A.; Romero, R. A. (2011). Using Traditional Heuristic Algorithms on an Initial Genetic Algorithm Population Applied to the Transmission Expansion Planning Problem. *Revista Ingeniería e Investigación*, 31(1), abril, pp. 127–143.
- Gallego, R. A. (1997). *Planejamento a longo prazo de sistemas de transmissão usando técnicas de otimização combinatorial*. Tesis Doctoral. Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Garver, L. L. (1970). Transmission Network Estimation Using Linear Programming. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 89(7), september, pp. 1688–1697.
- Hemmati, R.; Hooshmand, R-A.; Khodabakhshian, A. (2013). State-of-the-art of Transmission Expansion Planning: Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, pp. 312–319
- Infocables (2007). Conductores de Aluminio: 1350, 6201 y serie 8000, la importancia de las puestas a tierra. Procables S.A. n. 5 (enero), pp 3-9. [En línea]: Disponible en: <http://www.procables.com.co/downloads/infocables_edicion_5.pdf>. [Consultado el día 21 de octubre de 2012].
- Latorre, G.; Cruz, R.; Areiza, J. (2003). Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 18(2), mayo, pp. 938–946.
- Lee, C. W., et al., (2006). Transmission Expansion Planning from Past to Future. *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '06, IEEE PES*, october, pp. 257–265.
- Mateescu, E., et al., (2011). Reconductoring Using HTLS Conductors. Case study for a 220 kV double circuit transmission LINE in Romania. *Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO)*, 2011 IEEE PES 12th International Conference on, mayo, pp.1-7, 16-19.
- Mejía, A. (2008). *Análisis técnico y económico de la repotenciación de líneas aéreas de alta tensión en un sistema de subtransmisión*. Tesis de Pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Monticelli, A., et al., (1982). Interactive Transmission Network Planning Using a Least-effort Criterion. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 101(10) octubre, pp. 3919–3925.
- Romero, R.; Garcia, A.; Haffner, S. (2002). Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 149(1), enero, pp. 27–36.
- Sanchez, I. G., et al., (2005). Transmission Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear Programming Technique. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 152(6), noviembre, pp. 763–769.
- Silva, I.D.J., et al. (2005). Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand. *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*, 2 (junio), pp.1424-1429.
- Silva, Id.J., et al. (2006). Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.21(4), November, pp.1565-1573.
- Sousa, A.S.; Asada, E. N. (2011). A Heuristic Method Based on the Branch and Cut Algorithm to the Transmission System Expansion Planning Problem. *Power and Energy Society General Meeting, IEEE*, July, pp.1-6.
- Sum-Im, T., et al., (2006). A Comparative Study of State-of-the-art Transmission Expansion Planning Tools. Universities Power Engineering Conference. UPEC '06. *Proceedings of the 41st International*, 1, September, pp. 267–271.
- Thrash, F. R. Jr. (2001). ACSS/TW-an Improved High Temperature Conductor for Upgrading Existing Lines or New Construction. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 1, July, pp.182-185.
- Villasana, R.; Garver, L.; Salon, S. (1985). Transmission Network Planning Using Linear Programming. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 104(2) February, pp.349-356.
- Zamora, I., et al., (2001). High-Temperature Conductors: a Solution in the Uprating of Overhead Transmission Lines. *Power Tech Proceedings, IEEE Porto*, 4 September, pp.1-6.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Domínguez-Castaño, A. H.; Escobar-Zuluaga, A. H.; Gallego-Rendón, R.A. (2014). Metodología de solución para planeamiento de la transmisión considerando incertidumbre en la demanda y propuestas de diferentes conductores. *Revista EIA*, 11(21) enero-junio, pp. 99-111. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.e1.99-111>

