

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROBLEM OF SECONDARY  
DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING****MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA DEL PLANEAMIENTO  
DE SISTEMAS SECUNDARIOS DE DISTRIBUCIÓN**

**Ing. Julián D. González Hoyos, PhD. Ramón A. Gallego Rendón**  
**MSc. Ricardo A. Hincapié Isaza**

**Universidad Tecnológica de Pereira**

Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Eléctrica

La Julita, Pereira, Colombia

E-mail: {jdgonzalez, ragr, ricardohincapie}@utp.edu.co

**Abstract:** This paper presents a general mathematical model for the problem of planning of secondary distribution systems, which takes into account the location and sizing of secondary feeders and distribution transformers, the cost of repowering existing feeders and transformers, the cost of swing phase, the system operating costs and fixed costs incurred in the relocation of distribution transformers. The restrictions include nodal power balance, the maximum permitted in the capacity of the feeders and transformers, the maximum permissible voltage drop in system nodes and the maximum amount of investment available. The contribution of this paper lies in formulating a mixed integer nonlinear model involving each of the aspects considered by different authors in the literature on this subject, which allows it to be solved using optimization methods and adapted to different circumstances according to the criteria of the engineer in charge of planning the distribution system.

**Resumen:** En este trabajo se presenta un modelo matemático general para el problema del planeamiento de sistemas secundarios de distribución, el cual tiene en cuenta la ubicación y dimensionamiento de alimentadores secundarios y transformadores de distribución, el costo de repotenciación de alimentadores y transformadores existentes, el costo del balanceo de fases, los costos operativos del sistema y los costos fijos ocasionados por la reubicación de transformadores de distribución. Las restricciones planteadas incluyen el balance de potencia nodal, los límites máximos permitidos en la capacidad de los alimentadores y transformadores, las máximas caídas de tensión admisibles en los nodos del sistema y la partida máxima de inversión disponible. El aporte de este trabajo radica en la formulación de un modelo no lineal entero mixto que involucra cada uno de los aspectos considerados por diferentes autores dentro de la literatura especializada en esta temática, el cual permita ser resuelto usando métodos de optimización y adaptado a diferentes circunstancias de acuerdo a los criterios del ingeniero encargado de la planeación de un sistema de distribución.

**Keywords:** Secondary distribution system, mathematical modeling, combinatorial optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población, la industria y el comercio ocasionan un incremento en la demanda de energía. Este crecimiento de la carga está directamente relacionado con la expansión de los sistemas de distribución debido a la necesidad de abastecerla adecuadamente. La forma en que se realice la expansión de estos sistemas se conoce como el planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica (PSDE). Esta planeación debe garantizar un equilibrio técnico y económico para las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica con el fin de proporcionarles a los usuarios un servicio seguro y confiable y a un precio justo.

El PSDE ha sido tratado en la literatura especializada de diversas maneras. Las variantes que se presentan en la forma en que se aborda este tema obedecen a diferentes modelos matemáticos, técnicas de solución, planeación estática o dinámica, si tiene una única función objetivo o si es multiobjetivo y de acuerdo a la parte del sistema de distribución a planear.

Con respecto a este último aspecto, los sistemas de distribución se han dividido en dos subsistemas para realizar la planeación: el sistema primario (MT) y el sistema secundario (BT).

La planeación de sistemas de MT involucra la ubicación y dimensionamiento de nuevas subestaciones y alimentadores primarios, la ampliación de subestaciones existentes y la reconductorización de alimentadores primarios existentes (Bazán *et al.*, 2002; Ramírez *et al.*, 1994; Granada *et al.*, 2005; Almeida *et al.*, 2002).

La planeación de sistemas de BT considera la ubicación y dimensionamiento de nuevos transformadores de distribución y alimentadores secundarios, el cambio de transformadores nuevos por unos de mayor capacidad y la reconductorización de alimentadores secundarios existentes. Esta planificación tiene como propósito principal determinar la configuración óptima de la red, cuantificar el costo de inversión y ubicar el momento en el tiempo para la construcción de las distintas partes de la red con el fin de alcanzar costos globales mínimos asociados a la operación, expansión y construcción de dicho sistema. Este proceso debe estar enmarcado dentro del cumplimiento de ciertos requisitos técnicos.

El problema de la planeación de estos sistemas se ha considerado en la literatura especializada como una

minimización de una función objetivo que involucra los costos fijos o de inversión y los costos variables o de operación asociados a la expansión (Yoshimoto, 2003; Cossi *et al.*, 2005; Souza, 2006).

Yoshimoto (2003) presenta una metodología para el planeamiento de redes secundarias de distribución que busca minimizar los costos a través de métodos heurísticos de optimización. Esta metodología es trabajada en tres etapas donde la primera consiste en la ubicación de los transformadores de distribución empleando el método de las p-medianas. La segunda etapa consiste en la ubicación de los alimentadores secundarios por medio de un algoritmo que obtiene los caminos mínimos. Finalmente se emplea un problema de Steiner para la conexión de los transformadores de distribución a la red primaria.

Cossi *et al.* (2005) plantean el problema como un modelo no lineal entero mixto, el cual involucra en la función objetivo los costos fijos de la instalación de elementos nuevos (alimentadores secundarios, transformadores de distribución), de reubicación de transformadores de distribución existentes y del balanceo entre fases. Adicionalmente involucra los costos variables asociados a las pérdidas del sistema expresadas en forma cuadrática. El problema es solucionado por medio de Algoritmos Evolutivos.

Souza (2006) soluciona el problema usando un algoritmo de Búsqueda Tabú. El modelo matemático empleado considera una función objetivo que minimiza los costos fijos y variables que reflejan la expansión y operación de los elementos del sistema de distribución secundario. Los costos de inversión representan la instalación de estructuras, conductores y transformadores de distribución. Los costos variables representan las pérdidas del sistema. El modelo matemático es del tipo no lineal entero mixto.

Marroquín (2008) propone una metodología para solucionar el problema usando un algoritmo basado en colonia de hormigas. La función objetivo considera los costos fijos y variables de los diferentes elementos del sistema. El modelo matemático es no lineal entero mixto.

En este artículo se presenta un modelamiento general del problema de la expansión de sistemas de distribución secundarios, el cual incluye los diferentes costos fijos y variables que han sido tratados dentro de la literatura especializada de manera independiente. Cabe resaltar que dentro de la literatura no existe un modelo que reúna todos los aspectos considerados en este artículo, pues

involucra algunos términos que han sido tenidos en cuenta por algunos autores y descartados por otros. La motivación de este artículo entonces, consiste en poner a consideración de la comunidad científica un modelo de programación no lineal entero mixto que permita ser adaptado a diferentes circunstancias de acuerdo a criterios del diseñador y ser resuelto usando algún método de optimización.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Si la expansión de los sistemas de distribución secundaria no se realiza en una forma adecuada el sistema puede tener los siguientes problemas:

- Incremento en las pérdidas del sistema.
- Una regulación de voltaje deficiente.
- Sobrecargas en los alimentadores secundarios existentes.
- Sobrecargas en los transformadores de distribución existentes.
- Pérdida de confiabilidad y calidad del suministro de la energía eléctrica.

Con el fin de solucionar los problemas descritos en el párrafo anterior se pueden considerar los siguientes aspectos:

- La reubicación de transformadores de distribución existentes.
- La ubicación y dimensionamiento de nuevos transformadores de distribución.
- El aumento del calibre de los alimentadores secundarios existentes (reconductorización).
- La ubicación y dimensionamiento de nuevos alimentadores secundarios.
- Reconfiguración de la topología de la red.

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta en la solución del problema del planeamiento de estos sistemas es el desbalance de fases, esto debido a la conexión de diferentes cargas (monofásicas y trifásicas) que se conectan a las redes secundarias.

Para evitar los problemas mencionados anteriormente se debe realizar un diseño óptimo de los sistemas de distribución, con el fin de obtener una solución técnicamente factible. La planificación óptima posee, como principal propósito, determinar la configuración óptima de la red, qué inversiones deben realizarse y el momento de la construcción de las distintas partes de la red, con el fin de alcanzar costos globales mínimos asociados a dicho sistema, cumpliendo siempre un conjunto de restricciones técnicas.

## 3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA

En el problema que se pretende resolver se conocen algunos elementos existentes como transformadores de distribución y alimentadores secundarios. Cada nodo tiene asociada una determinada demanda de potencia y cada fuente tiene un límite máximo de la potencia de suministro. Se conocen, además, varias posibles rutas para la construcción de líneas eléctricas con el fin de transportar la potencia desde los transformadores de distribución hasta las cargas. Cada una de las líneas posee un costo que depende principalmente de su longitud (costos fijos) y del valor de potencia que transporta (costos variables). Dentro de las restricciones se debe señalar que los conductores que pueden utilizarse para la construcción de las líneas poseen unos límites térmicos en cuanto a la potencia máxima que pueden transportar, y los transformadores poseen también, como se dijo antes, unos límites en la potencia que pueden suministrar.

Además, se deberá satisfacer la primera ley de Kirchhoff en todos los nodos del sistema de distribución de energía eléctrica, así como las restricciones de máximas caídas de tensión en ellos y la restricción de radialidad.

Cada una de las posibles rutas en las que se puede construir una línea eléctrica llevará asociadas, en principio, dos variables continuas representativas del flujo de potencia. En este sentido, se considera que para cada línea existen dos arcos y por lo tanto, dos variables continuas. Suponiendo que existe una línea entre los nodos 1 y 2, habrá entonces entre estos nodos dos arcos (flujos de potencia) en sentido contrario, los flujos  $f_{1-2}$  y  $f_{2-1}$ . En el proceso de optimización se obtendrán los valores óptimos de dichas variables. Por lo tanto se determinarán los valores de los flujos óptimos de potencia en la red de distribución.

Al colocar dos arcos, y por lo tanto tener en cuenta dos variables continuas para cada línea, si una de estas variables no es nula, es necesario que la otra si lo sea ya que en otro caso no se alcanzaría el costo mínimo en la función objetivo del proceso de optimización. Se puede observar que el aumentar la cantidad de potencia que circula por una línea eléctrica influye en la función objetivo incrementando su valor. Transportar dos valores de potencia (en dos sentidos opuestos) en una línea, podría parecer inicialmente un resultado matemático posible (ya que ello forma parte de la formulación

matemática), pero el proceso de optimización siempre forzará a alcanzar un valor nulo de, al menos, uno de los dos posibles flujos de potencia en cada una de las líneas eléctricas (líneas existentes en el sistema de distribución inicial y líneas futuras propuestas para construir en la ampliación de dicho sistema de distribución), esto con el fin de garantizar la radialidad del sistema.

En los trabajos de investigación realizados se ha considerado que las variables continuas citadas representan potencias aparentes, pero podrían también representar corrientes. En cualquier caso, afectan directamente los costos variables de las líneas asociados a las pérdidas de energía por efecto Joule.

Además de las variables continuas asociadas a los flujos de potencia, existen unas variables binarias asociadas a la utilización, o no, de las posibles rutas que inicialmente se han propuesto para la instalación de líneas eléctricas. Cada posible tamaño de conductor propuesto para la construcción de líneas poseerá una variable binaria asociada, que adoptará el valor cero si no se utiliza para la construcción de una línea eléctrica con ese tamaño de conductor y un valor de uno si se construye utilizándolo. Por ejemplo, el alimentador que une los nodos 1 y 2 tendrá asignada una variable binaria que puede denotarse como  $(X_{1,2})_2$ , la cual está asociada a la utilización del alimentador que une los nodos 1 y 2, haciendo uso del tamaño de conductor 2. Si el valor de todas las variables binarias asociadas a una ruta es nulo, entonces los flujos de potencia asociados deberán ser nulos. Una vez se determina el tamaño del conductor que se va a utilizar para la construcción de una determinada línea eléctrica, haciendo uso de una de las rutas propuestas, los flujos existentes en los arcos asociados a dichas rutas pueden denotarse por medio de  $f_{1,2}$  y  $f_{2,1}$ , indicando de esta forma que son flujos que circulan por una línea construida. Las variables binarias intervienen directamente en los costos fijos asociados a las líneas eléctricas que formarán parte de la función objetivo junto a los costos variables señalados anteriormente.

En cuanto a los transformadores de distribución, en el diseño óptimo se incluyen aspectos similares a los ya indicados para las líneas eléctricas: variables binarias para determinar su localización y variables continuas para determinar los flujos de potencia que suministran las subestaciones, costos asociados a las subestaciones y límites máximos de capacidad de potencia.

El problema del planeamiento de sistemas secundarios de distribución debe ser modelado con el mismo grado de precisión que los problemas de operación en estos

mismos sistemas. Con el fin de lograr esto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las cargas son representadas como un modelo de corriente constante, lo que significa que las cargas no varían con los voltajes nodales.
- Con el fin de facilitar el modelamiento matemático y la solución del problema del planeamiento, pueden ser usados los centros de demanda. Estos representan un grupo de usuarios los cuales para propósitos eléctricos y de cálculos son considerados como un único nodo.
- Los costos de inversión y de operación y las diferentes posibilidades de localización de los alimentadores secundarios y transformadores de distribución propuestos son conocidos de antemano.

### 3.1. Variables empleadas en el modelo

- $z$ : función objetivo.
- $k$ : tipo o calibre del conductor.
- $RD_{MAX}$ : máximo recurso disponible para invertir en el proyecto.
- $M$ : tipo de transformador de acuerdo a su capacidad.
- $CREC_{ij,k}$ : costo de inversión de reconductorizar en la ruta  $ij$ , conductor tipo  $k$ .
- $CF_{ij,k}$ : costo de inversión de un alimentador secundario entre los nodos  $i-j$ , conductor tipo  $k$ .
- $CF_{i,M}$ : costo de inversión de un transformador de distribución en el nodo  $i$ , tipo  $M$ .
- $CFB_i$ : costo fijo del balance de cargas.
- $CT_{i,M}$ : costo fijo de reubicar un transformador existente tipo  $M$ .
- $C_{kwh}$ : costo de la energía expresada en  $[\$/kW-h]$ .
- $T$ : período de planeamiento en horas.
- $R_{ij,k-abc}$ : resistencia del conductor tipo  $k$  entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $X_{ij,k-abc}$ : reactancia del conductor tipo  $k$  entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ij-abc}$ : corriente entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ji-abc}$ : corriente entre los nodos  $j-i$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ij-abc}^{max}$ : corriente máxima permitida entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{i-abc}$ : caída de voltaje en el nodo  $i$  para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{j-abc}$ : caída de voltaje en el nodo  $j$  para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{i-abc}^{max}$ : máximo voltaje permitido en todos los nodos del sistema, para las fases  $a-b-c$ .

- $V_{i-abc}^{\min}$ : mínimo voltaje permitido en todos los nodos del sistema, para las fases a-b-c.
- $O_{AN}$ : conjunto de alimentadores nuevos del sistema.
- $O_{AE}$ : conjunto de alimentadores existentes del sistema.
- $O_A: O_{AN} \cup O_{AE}$
- $O_{TN}$ : conjunto de transformadores nuevos del sistema.
- $O_{TE}$ : conjunto de transformadores existentes del sistema.
- $O_T: O_{TN} \cup O_{TE}$
- $O_R$ : conjunto de tramos del sistema a reconductorizar.
- $O_B$ : conjunto de puntos que representan las posiciones de las cargas en las fases.
- $n$ : número total de nodos.
- $n_{fex}$ : número de alimentadores existentes.
- $n_{tex}$ : número de transformadores existentes.
- $d_{ij,k}$ : variable de decisión binaria para la instalación de un conductor tipo k, ruta ij.
- $d_{i,M}$ : variable de decisión binaria para la instalación de un transformador tipo M, nodo i.
- $dREC_{ij,k}$ : variable de decisión binaria para reconductorizar en la ruta ij, conductor tipo k.
- $dCT_{i,M}$ : variable de decisión binaria para reubicar transformadores existentes, tipo M.
- $d_i$ : variable de decisión binaria para realizar balanceo de cargas.
- $P_{i-abc}^{\text{in}}$ : potencia activa inyectada al nodo i.
- $Q_{i-abc}^{\text{in}}$ : potencia reactiva inyectada al nodo i.
- $P_{i-abc}^c$ : potencia activa consumida en el nodo i.
- $Q_{i-abc}^c$ : potencia reactiva consumida en el nodo i.
- $G_{ij,k-abc}$ : conductancia del conductor tipo k en la ruta ij, para las fases a-b-c.
- $B_{ij,k-abc}$ : susceptancia del conductor tipo k en la ruta ij, para las fases a-b-c.
- $P_{i-abc}^T$ : potencia activa nominal del transformador en el nodo i.
- $Q_{i-abc}^T$ : potencia reactiva nominal del transformador en el nodo i.

### 3.2. Formulación de la Función Objetivo

La función objetivo tiene en cuenta el menor costo fijo (costos de inversión) y costo variable (costos de operación) envueltos en la expansión y la operación del sistema durante el período de planeamiento. El plan óptimo de expansión corresponde a la configuración topológica del sistema que satisface los criterios técnicos a un mínimo costo. Una vez conocidos estos costos, la función objetivo a ser minimizada puede ser escrita como se ilustra en la ecuación 1.

$$z = \left[ \begin{aligned} & \sum_{ij \in O_{AN}} (d_{ij,k} * C F_{ij,k}) + \sum_{i \in O_{TN}} (d_{i,M} * C F_{i,M}) \\ & + \sum_{ij \in O_{AE}} \sum_{k \in O_R} (dREC_{ij,k} * C REC_{ij,k}) + \\ & \sum_{ij \in O_{AN}} \left[ C_{kwh} * T * R_{ij,k-abc} * |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2 \right] \\ & + \sum_{i \in O_{TE}} dCT_{i,M} * C T_{i,M} + \sum_{i \in O_B} d_i * C FB_i + \\ & \sum_{ij \in O_{AE}} \left[ C_{kwh} * T * R_{ij,k-abc} * |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2 \right] \end{aligned} \right] \quad (1)$$

En esta ecuación los dos primeros términos tienen en cuenta el costo fijo de la instalación de nuevos alimentadores secundarios y transformadores de distribución, respectivamente. El tercer término corresponde al valor de reconductorizar un alimentador secundario existente. La cuarta expresión representa los costos operativos de alimentadores existentes. El siguiente término involucra el valor de reubicar transformadores de distribución existentes. Las últimas dos expresiones tienen en cuenta el costo del balanceo de fases y los costos operativos de alimentadores existentes, respectivamente.

### 3.3. Formulación de las Restricciones

*Balace de Demanda:* se basa en la aplicación de las Leyes de Kirchhoff a cada nodo del sistema. Estas restricciones aseguran para cada nodo que la sumatoria de flujo de potencia sea nula. Todos los nodos, incluidos los transformadores, son involucrados en las ecuaciones. Los flujos en los transformadores deben ser considerados para las restricciones de balance de demanda.

$$\begin{aligned} P_{i-abc}^{\text{in}} - P_{i-abc}^c - V_{i-abc} \sum_{j \in n} V_{j-abc} \left[ (G_{ij,k-abc} * \cos^2_{ij-abc}) - (B_{ij,k-abc} * \text{sen}^2_{ij-abc}) \right] &= 0 \\ Q_{i-abc}^{\text{in}} - Q_{i-abc}^c - V_{i-abc} \sum_{j \in n} V_{j-abc} \left[ (G_{ij,k-abc} * \text{sen}^2_{ij-abc}) - (B_{ij,k-abc} * \cos^2_{ij-abc}) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

*Máximo flujo de potencia:* asegura que la capacidad máxima de los alimentadores y transformadores no se exceda durante el período de planeamiento. La primera ecuación involucra los límites máximos para los alimentadores. Los otros dos términos corresponden a la capacidad máxima de potencia activa y reactiva de los transformadores.

$$\begin{aligned} |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}| &\leq I_{ij-abc}^{\text{max}} \\ \sum_{i \in n} P_{i-abc}^c + \sum_{ij \in O_A} (R_{ij,k-abc}) * (|I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2) &\leq \sum_{i \in O_{TE}} P_{i-abc}^T \\ \sum_{i \in n} Q_{i-abc}^c + \sum_{ij \in O_A} (X_{ij,k-abc}) * (|I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2) &\leq \sum_{i \in O_{TE}} Q_{i-abc}^T \end{aligned} \quad (3)$$

*Radialidad:* con esta ecuación se garantiza que solamente existan topologías radiales para la configuración de la red, permitiendo que todos los nodos de carga y los transformadores no queden en subsistemas aislados en la solución final.

$$n_{\text{tex}} + \sum_{ij \in O_{AN}} d_{ij,k} \leq n - n_{\text{tex}} - \sum_{i \in O_{TN}} d_{i,M} \quad (4)$$

*Caídas de tensión permitidas:* la caída de tensión de todos los nodos es calculada entre el transformador y cada uno de los nodos.

$$V_{i-abc}^{\min} \leq V_{i-abc} \leq V_{i-abc}^{\max} \quad (5)$$

*Máxima Inversión permitida:* se debe garantizar que el valor de la función objetivo no supere el valor de los recursos máximos disponibles para el proyecto.

$$z \leq RD_{MAX} \quad (6)$$

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se propuso un modelo matemático general para el problema del planeamiento de redes secundarias. Se tuvieron en cuenta la topología de la red, el tipo de conductor, costos de reconductorización, balanceo de fases y pérdidas técnicas. También se incluyeron los costos de localización y dimensionamiento de transformadores de distribución. Las restricciones incluyen balance de potencia nodal, límites de capacidad de potencia de los alimentadores y transformadores, caídas de tensión admisibles en los nodos del sistema y la inversión máxima disponible.

El modelo matemático propuesto es del tipo no lineal entero mixto. Este problema debido a su complejidad matemática es considerado como NP completo. Dicho lo anterior, las técnicas metaheurísticas de optimización proporcionan diferentes alternativas de solución que han obtenido buenos resultados y han mostrado ser eficientes en las diferentes implementaciones de este tipo.

Este problema puede ser resuelto de forma completa o simplificada, esto de acuerdo a las necesidades del ingeniero encargado de la planeación del sistema. Es claro que en todos los casos no se tienen los mismos requisitos e intereses, por tanto, es preciso anotar que el modelo puede ser ajustado a los requerimientos que cada quien considere más relevantes.

Una de las mayores dificultades en la solución de un modelo matemático es que éste involucre variables

enteras. Existen diferentes maneras de tratar esta dificultad. Una de ellas consiste en descomponer el problema en dos partes: la de inversión y la de operación. La primera parte debe ser resuelta aplicando técnicas enteras, lo cual arrojará unas soluciones que son los datos de entrada del problema operativo, el cual en este caso es un problema no lineal. Otra alternativa se fundamenta en que para problemas de alta complejidad, es conveniente que en la inicialización del proceso de solución se relajen las restricciones asociadas a este tipo de variables y permitan que sean trabajadas como variables continuas, toda vez que esto facilita que la técnica parta de puntos de buena calidad.

Es conocido que para este tipo de problemas donde intervienen varios objetivos, la aplicación de técnicas multiobjetivo arrojan resultados más satisfactorios, siempre teniendo la precaución de no involucrar más de tres objetivos al mismo tiempo. Otra de las ventajas de implementar este tipo de técnicas radica en el hecho puntual que éstas no arrojan una solución, sino un conjunto de alternativas igualmente atractivas desde el punto de vista de los objetivos que intervienen en el proceso, lo cual facilita la toma de decisión fundamentada en los propios intereses de la empresa de distribución.

#### 5. REFERENCIAS

- Bazán, F.A., Mantovani, J.R., Romero, R.A. (2002). *Planeamiento de Expansión de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Búsqueda Tabú*, Presentado en: XIV Congreso Brasileiro de Automatización, Natal, Brasil.
- Ramírez R., Adams, I.J., Gönen, R.N. (1994). *Computer Aided Design of Power Distribution Systems: Multiobjective Mathematical Simulations*, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 9-12.
- Granada M., Gallego R., Hincapié, R. (2005). *Planeamiento de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando Branch And Bound*, Revista Ingeniería, Universidad Distrital, Vol. 10, No. 2, pp. 44-50.
- Almeida, M.S., Mantovani, J.R., Romero, R.A. (2002). *Colocación Óptima de Subestaciones y Alimentadores en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Branch and Bound*, Presentado en: XIV Congreso Brasileiro de Automatización, Natal, Brasil.

- Yoshimoto, E. (2003). *Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica*, Tesis de Maestría, UNICAMP, Brasil.
- Cossi, A. M., Romero, R., Mantovani, J. R. (2005). *Planning of Secondary Distribution Circuits Through Evolutionary Algorithms*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1.
- Souza, C. H. (2006). *Planejamento e Projeto de Circuitos Secundários de Distribuição de Energia Elétrica por meio de Algoritmo Busca Tabu*, Tesis de Maestría, UNESP, Brasil.
- Marroquín, O. A. (2008). *Planeamiento de Redes Secundarias de Distribución Usando un Algoritmo de Optimización Basado en Colonia de Hormigas*, Tesis de Pregrado, Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.