

PLANEAMIENTO DE SUBESTACIONES Y ALIMENTADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO PROGRAMACIÓN ENTERA

RESUMEN

Se presenta una metodología matemática para resolver el problema del planeamiento de redes de distribución que incluye la localización y dimensionamiento de nuevas subestaciones y redimensionamiento de las existentes, reconductorización, de alimentadores existentes y enrutamiento y selección de conductor de los alimentadores nuevos. Para la solución del modelo matemático se emplea un algoritmo de Branch and Bound. Este modelo es del tipo Lineal Entero Mixto (PLEM), y es de difícil solución por su carácter combinatorial, debido a su gran complejidad computacional. Para su comprobación se emplea un sistema de la literatura especializada, obteniéndose resultados de alta calidad.

PALABRAS CLAVES:

Sistemas de Distribución, programación lineal, Branch and Bound, optimización combinatorial.

ABSTRACT

This paper presents a mathematical methodology used to solve the power distribution planning problem which includes the location and sizing of the new substations and resizing the old ones; existing feeders reconductorizing, and routing and selection of the new conductors on the new feeders. To solve the mathematical problem a Branch and Bound algorithm is used. The model is Lineal Mixed Integer Programming type, considering that it is a difficult problem due to its combinatorial characteristics, and its high computational complexity. To test the proposed algorithm a well documented power distribution system is used, and high quality results were obtained.

KEYWORDS:

Distribution Systems, linear programming, Branch and Bound, combinatorial optimization.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la carga en los sistemas de distribución obedece, por una parte al crecimiento propio de las cargas ya existentes y por otra, a la incorporación al sistema de nuevas. Este crecimiento de la carga requiere ser abastecido teniendo en cuenta mayor cantidad de energía y aumento en la capacidad de la red para el transporte y distribución de la misma con adecuados estándares de calidad, confiabilidad y costos. El suministro de esta energía debe ser oportuno y de calidad, convirtiéndose en un reto para las empresas de energía eléctrica el garantizar un suministro de energía a corto, mediano y largo plazo sin incurrir en costos muy altos para los usuarios. El estudio del crecimiento de la demanda de energía eléctrica y la adecuada expansión de los sistemas de distribución es conocido como el planeamiento de sistemas de distribución, donde su objetivo principal es garantizar la continuidad y calidad del servicio eléctrico manteniendo la viabilidad de las

empresas y un costo mínimo de la energía para el usuario.

Como se presenta en [7], la complejidad matemática para la solución del modelo planteado para un sistema en el cual se lleve en cuenta localización y dimensionamiento de subestaciones nuevas y enrutamiento de alimentadores nuevos, es alta. Si se considera que en este trabajo en el modelo matemático son incorporadas nuevas condiciones operativas, como son: reconductorización de alimentadores existentes y redimensionamiento de subestaciones existentes, la complejidad matemática del modelo es mucho mayor y por lo tanto su solución presenta un mayor grado de dificultad.

Con el fin de presentar un modelo más ajustado a la operación real de los sistemas de distribución, este modelo es resuelto en varias etapas (planeamiento multietapa). Esta forma de planeamiento por etapas incorpora una mayor complejidad en la solución que hace más difícil encontrar el óptimo global del problema.

RICARDO ALBERTO HINCAPIÉ ISAZA

Ingeniero Electricista, Ms.C
Universidad Tecnológica de Pereira
ricardohincapie@utp.edu.co

MAURICIO GRANADA ECHEVERRI

Ingeniero Electricista, Ms.C
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
magra@utp.edu.co

RAMÓN ALFONSO GALLEGO RENDÓN

Ingeniero Electricista, Ph.D.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
ragr@utp.edu.co

Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos.

El modelo multietapa generalmente se aplica al planeamiento de largo plazo. Este período es dividido en varios intervalos de acuerdo al tiempo de estudio, al sistema y al criterio del planificador.

Para la solución del problema anterior se han propuesto en la literatura técnicas heurísticas, optimización clásica y optimización combinatorial. En la línea de solución usando optimización clásica son propuestas técnicas de programación lineal entera mixta usando Branch and Bound [1,7], programación cuadrática entera mixta [5] y algoritmos basados en técnicas de descomposición [3]. En la línea de investigación que propone la solución a través de algoritmos combinatoriales se tienen los Algoritmos Genéticos [6] y Búsqueda Tabú [2].

En el artículo [7] los autores presentan una metodología para el planeamiento de redes de distribución que incluye ubicación de subestaciones y enrutamiento de alimentadores nuevos.

En este, artículo además de lo anterior, se incluyen: restricciones de radialidad del sistema, capacidades máximas de subestaciones y alimentadores, caídas de tensión permitidas en los nodos y balance nodal de todo el sistema. La técnica de solución empleada es un Algoritmo de Branch and Bound aplicada a un sistema de la literatura especializada [4].

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con el fin de atender el crecimiento de la demanda de los sistemas de distribución se hace necesario un adecuado planeamiento, construcción y operación de los mismos. El crecimiento de la carga en los sistemas de distribución requiere de las siguientes adecuaciones:

- Instalación de nuevos alimentadores.
- Instalación de nuevas subestaciones.
- Ampliación de las subestaciones existentes.
- Cambio del calibre de los alimentadores existentes.
- Instalación de equipos para inyección de reactivos.
- Instalación de seccionadores e interruptores.
- Instalación de reguladores de tensión.

Si el crecimiento de la demanda no se atiende adecuadamente se pueden presentar los siguientes problemas:

- Sobrecargas en los alimentadores cuando su capacidad máxima de potencia es excedida.
- Sobrecargas en los transformadores primarios cuando su capacidad máxima de potencia es excedida.
- Desmejoramiento del perfil de tensión debido a problemas de regulación.

- Incremento en las pérdidas en transformadores y alimentadores.
- Se puede perder la radialidad del sistema.

El modelo matemático formulado en este trabajo corresponde a un problema de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) debido a que incluyen variables enteras y continuas. Las variables enteras son variables de decisión que corresponden a la instalación de nuevos alimentadores y nuevas subestaciones y las variables continuas corresponden al flujo de potencia por los alimentadores. El modelo es lineal ya que tanto la función objetivo planteada como las restricciones son de este tipo.

Para implementar el modelo matemático se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los alimentadores y subestaciones existentes no tienen asignado un costo de inversión pero si tienen asignado un costo de operación.
- Con el fin de facilitar el modelamiento matemático y la solución del problema del planeamiento, los centros de demanda son definidos y representan un grupo de alimentadores primarios y/o secundarios, los cuales para propósitos eléctricos y de cálculos son considerados como un único nodo.
- No hay pérdida de potencia por el tramo de un alimentador.
- Los costos de inversión y la localización de los alimentadores y subestaciones propuestas son conocidos anticipadamente.
- El factor de potencia del sistema es considerado constante.
- Las cargas son representadas por un modelo de corriente continua o sea que no varían con sus respectivas tensiones.

3. MODELO MATEMÁTICO

Con base en lo descrito anteriormente, se plantea el siguiente modelo matemático:

$$\min z = \left[\begin{array}{l} \sum (\delta_{ij} * CF_{ij}) + \sum (\delta_{RECij} * CR_{ij}) + \\ \sum [CV_{ij} * (X_{ij} + X_{ji})] + \sum (\delta_i * CF_i) \end{array} \right] \quad (1)$$

$$\text{s.a. } (X_{ij} - X_{ji}) - S_i + D_i = 0 \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq \bar{X}_{ij} \quad (3)$$

$$S_i \leq \bar{S}_i \quad (4)$$

$$\sum \delta_{ij} \leq n - 1 \quad (5)$$

$$\Delta V_{\min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_{\max} \quad (6)$$

$$\delta_{ij}, \delta_{RECij}, \delta_i \text{ Binarias} \quad (7)$$

$$X_{ij}, X_{ji} \quad \text{Irrestricto} \quad (8)$$

Donde z es el costo de inversión en alimentadores y subestaciones, CF_{ij} , CV_{ij} y CR_{ij} son los costos de adición, de operación y de reconductorización de un alimentador entre los nodos i - j respectivamente, δ_{ij} y δ_{RECij} son las variables de decisión para la instalación y reconductorización de un alimentador entre los nodos i - j respectivamente, δ_i es la variable de decisión para la instalación o no de una subestación en el nodo i , X_{ij} es

la capacidad máxima de los alimentadores y \bar{S}_i es la capacidad máxima de las subestaciones respectivamente, X_{ij} y X_{ji} son los flujos de potencia por los alimentadores entre los nodos i - j y CF_i el valor de adicionar una nueva subestación. ΔV_{\min} y ΔV_{\max} son los límites de tensión mínimos y máximos permitidos, ΔV_i el nivel de tensión de cada nodo y n el número total de nodos del sistema en la configuración final.

La función objetivo tiene en cuenta los costos fijos y variables de los elementos que componen el sistema tanto en la operación como en la expansión durante un período de planeamiento. La solución óptima se refiere al menor costo calculado para una configuración inicial dada de la red. Los costos fijos representan la inversión en la instalación de nuevos alimentadores y nuevas subestaciones en el sistema y la reconductorización de alimentadores existentes. Los costos variables representan los costos necesarios para operar el sistema eléctrico de potencia principalmente debido a las pérdidas óhmicas. Este es considerado en forma lineal.

Las restricciones planteadas en el modelo son:

Balance de Demanda: se basa en la aplicación de la Primera Ley 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, incluidas las subestaciones son incluidas en las ecuaciones. Los flujos en las subestaciones deben ser considerados para las restricciones de balance de demanda.

Máximo flujo de potencia: asegura que la capacidad máxima de los alimentadores y las subestaciones no se exceda durante el período de planeamiento.

Radialidad: busca que la configuración óptima sea radial. Se implementó considerando que la sumatoria de variables binarias correspondientes a los alimentadores que quedaran en la configuración final fueran menor o igual al número de nodos menos 1.

Caídas de tensión permitidas: estas restricciones deben ser incluidas dinámicamente en el modelo, donde la caída de voltaje a lo largo de un alimentador propuesto debe ser considerado solamente cuando el modelo decide su

instalación. La caída de tensión de todos los nodos es calculada entre el nodo de entrada a la red (subestación) y cada uno de los nodos.

4. MÉTODO DE SOLUCIÓN

El algoritmo de Branch and Bound (separar y sondear) es un método exacto para encontrar la solución de un problema lineal con soluciones enteras (PLE) o entero mixto (PLEM) [3].

La filosofía del Branch and Bound es resolver un PLEM resolviendo un conjunto de problemas de programación lineal (PL) que son versiones relajadas del PLEM, los cuales pueden ser resueltos por técnicas de solución conocidas o mediante software especializado.

Inicialmente se resuelve el problema original relajando la integralidad de sus variables enteras (permitiendo que las variables enteras tengan valor real), al cual llamaremos Problema P0. Si el problema tiene solución entera en todas las variables enteras, esto significa que se ha encontrado la solución óptima global.

Si el problema no presenta solución entera, se debe separar el problema en dos subproblemas escogiendo una variable con valor actual no entero para separar, obteniendo los problemas de la siguiente manera.

Subproblema P1

- Es el Problema P0 más una restricción de la forma

$$n_{ij} \leq \lfloor n_{ij}^* \rfloor$$

Subproblema P2

- Es el Problema P0 mas una restricción de la forma

$$n_{ij} \geq \lfloor n_{ij}^* \rfloor + 1$$

Donde $\lfloor n_{ij}^* \rfloor$ es el mayor entero contenido en la variable n_{ij} que es separada.

Lo que se hace al restringir estos subproblemas es resolver un PL con un espacio solución menor que encierra la solución entera buscada, por lo tanto estos subproblemas se deben resolver al igual que el primero, y si no tienen solución entera se debe repetir el proceso hasta que el espacio solución sea agotado, convirtiéndose en un problema de enumeración donde son listadas todas las posibles soluciones de un problema y se determina cual es la mejor, lo cual facilita encontrar soluciones óptimas alternativas. Sin embargo este método presenta problemas de eficiencia computacional por la gran cantidad de datos a almacenar en problemas de gran tamaño.

Criterios de convergencia:

- El problema resuelto tiene solución entera, por lo tanto no se puede separar.
- El problema no tiene solución entera pero presenta una solución de peor calidad que la de una solución entera ya encontrada, esto es, el problema puede tener solución entera dentro de su región factible, pero esta no otorgaría una mejor respuesta que la ya conocida. Es así como el contar con una buena incumbente inicial puede acelerar el proceso de convergencia.
- La solución del problema es infactible, por lo tanto cualquier problema que se desprenda de él posee mayor nivel de infactibilidad.

Con el fin de facilitar la solución del PL existen diferentes estrategias, la más común es utilizar la regla LIFO (Last In First Out), en donde se resuelve siempre el último PL generado ahorrando espacio en memoria al utilizar la respuesta inmediatamente anterior para resolver el nuevo problema mediante una técnica de dual Simplex canalizado.

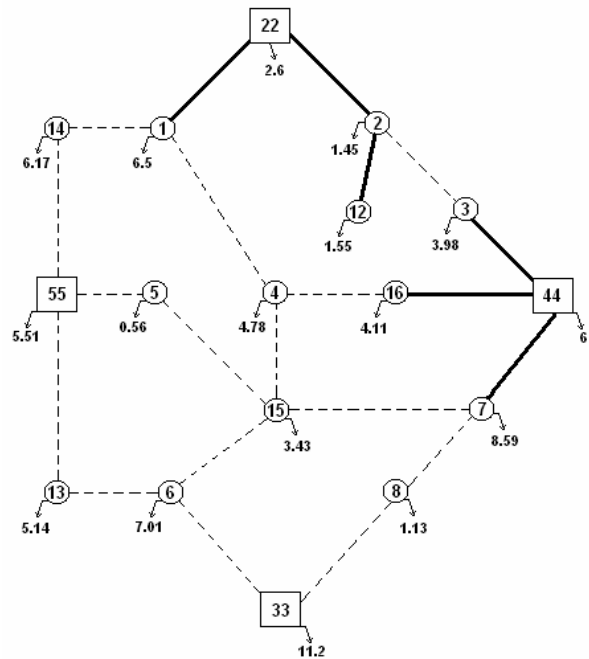


Figura 1. Configuración inicial del sistema de prueba

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

El algoritmo de Branch and Bound fue implementado en el software de optimización GAMS.

El sistema propuesto cuenta con seis (6) alimentadores existentes (líneas llenas) y quince (15) alimentadores propuestos (líneas discontinuas), dos subestaciones existentes (22 y 44) y dos subestaciones propuestas (33 y 55). Se tienen tres tipos de conductores propuestos para los alimentadores nuevos y dos calibres para efectuar la reconductorización de los alimentadores existentes.

El estudio se lleva a cabo en tres etapas, cada una de estas de igual duración. La demanda para la primera etapa se ilustra en la Figura 1. La demanda para la segunda etapa tiene un incremento del 20% con respecto a la primera etapa y la demanda para la tercera etapa tiene un incremento del mismo valor con respecto a la segunda etapa.

Los costos fijos y variables y el límite máximo permitido de potencia para todos los calibres de los alimentadores se muestra en la Tabla 1. Los costos fijos y los límites máximos de potencia de las subestaciones se ilustran en la Tabla 2. La máxima caída de voltaje permitida para todos los nodos del sistema es del $\pm 5\%$ con respecto al Voltaje Nominal del sistema (11 kV). La impedancia para todos los calibres de los alimentadores es la misma e igual a 0.1 [pu/km].

LÍNEA	CONDUCTOR	COSTO FIJO (UNID)	COSTO VARIABLE (UNID)	CAPACIDAD (MVA)
3_44	a	0.000	6.00	20.0
3_44	b	1.875	8.00	25.0
3_44	c	0.900	12.00	30.0
7_44	a	0.000	6.00	20.0
7_44	b	1.875	8.00	25.0
7_44	c	0.900	12.00	30.0
16_44	a	0.000	8.00	20.0
16_44	b	1.875	10.66	25.0
16_44	c	0.900	16.00	30.0
2_22	a	0.000	6.00	20.0
2_22	b	1.875	8.00	25.0
2_22	c	0.900	12.00	30.0
1_22	a	0.000	6.00	20.0
1_22	b	1.875	8.00	25.0
1_22	c	0.900	12.00	30.0
2_12	a	0.000	2.00	10.0
2_12	b	1.250	2.66	12.5
2_12	c	0.600	4.00	15.0
1_4	a	2.500	4.80	10.0
1_4	b	3.125	6.40	12.5
1_4	c	1.500	9.60	15.0
5_55	a	1.000	4.00	20.0
5_55	b	1.250	5.33	25.0
5_55	c	0.600	8.00	30.0

14_55	a	2.000	8.00	20.0
14_55	b	2.500	10.66	25.0
14_55	c	1.200	16.00	30.0
13_55	a	2.000	8.00	20.0
13_55	b	2.500	10.66	25.0
13_55	c	1.200	16.00	30.0
1_14	a	1.000	2.00	10.0
1_14	b	1.250	2.66	12.5
1_14	c	0.600	4.00	15.0
2_3	a	1.500	3.00	10.0
2_3	b	1.875	4.00	12.5
2_3	c	0.900	6.00	15.0
5_15	a	1.500	3.00	10.0
5_15	b	1.875	4.00	12.5
5_15	c	0.900	6.00	15.0
6_13	a	1.000	2.00	10.0
6_13	b	1.250	2.66	12.5
6_13	c	0.600	4.00	15.0
6_15	a	1.500	3.00	10.0
6_15	b	1.875	4.00	12.5
6_15	c	0.900	6.00	15.0
6_33	a	1.500	6.00	20.0
6_33	b	1.875	8.00	25.0
6_33	c	0.900	12.00	30.0
7_8	a	1.500	3.00	10.0
7_8	b	1.875	4.00	12.5
7_8	c	0.900	6.00	15.0
7_15	a	2.000	4.00	10.0
7_15	b	2.500	5.33	12.5
7_15	c	1.200	8.00	15.0
8_33	a	1.500	6.00	20.0
8_33	b	1.875	8.00	25.0
8_33	c	0.900	12.00	30.0
4_15	a	1.000	2.00	20.0
4_15	b	1.250	2.66	25.0
4_15	c	0.600	4.00	30.0
4_16	a	1.000	2.00	10.0
4_16	b	1.250	2.66	12.5
4_16	c	0.600	4.00	15.0

Tabla 1. Datos generales de los alimentadores

Los resultados encontrados para este sistema se observan en las figuras 2, 3 y 4 correspondientes a las etapas de planeamiento 1, 2 y 3 respectivamente. Los valores de las funciones objetivo se ilustran en la Tabla 3.

SUBESTACIÓN	COSTO FIJO (UNID)	CAPACIDAD MÁXIMA (MVA)
22	0	35
44	0	35
33	600	40
55	600	40

Tabla 2. Datos generales de las subestaciones

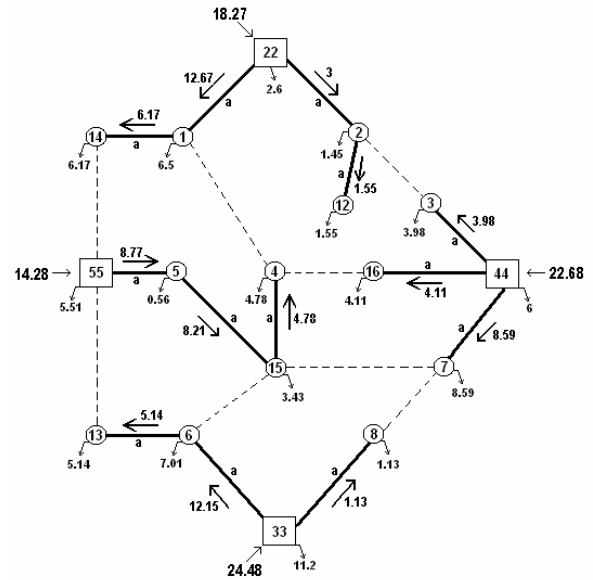


Figura 2. Configuración de la primera etapa

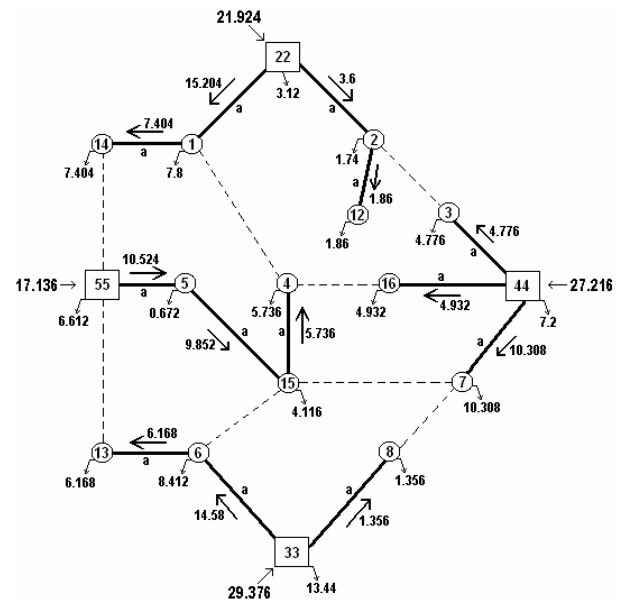


Figura 3. Configuración de la segunda etapa

ETAPA	1	2	3
VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO (UNIDADES)	1585.49	452.388	542.86

Tabla 3. Costo de cada etapa

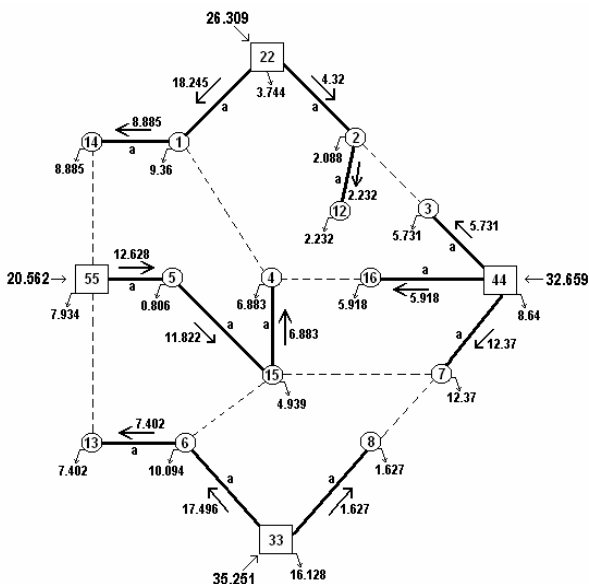


Figura 4. Configuración de la tercera etapa

De las figuras anteriores se observa que se mantiene la misma configuración para las tres etapas planteadas. Adicionalmente se observa que en los alimentadores se emplea el mismo calibre de conductor (calibre a) para todo el proceso de planeamiento. El motivo es que los valores de las cargas no presentan un incremento considerable debido al corto período de cada etapa de planeamiento, ocasionando que los conductores elegidos sean los de menor capacidad. A pesar de esto el algoritmo alcanza el valor óptimo para las etapas logrando cumplir con todos los criterios técnicos impuestos por el sistema.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un modelo matemático del tipo Lineal Entero Mixto (PLEM), resuelto a través de un algoritmo de Branch and Bound, obteniendo resultados de alta calidad.

Los resultados obtenidos con las simulaciones del sistema de potencia comprueban la eficiencia de la metodología propuesta debido a que se encontró la configuración óptima para el modelo lineal entero mixto alcanzando la misma configuración óptima encontrada en la literatura especializada.

El sistema de la literatura especializada se estudio incorporando la metodología multietapas, obteniéndose la respuesta óptima.

7. AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan su agradecimiento a la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, por su apoyo al grupo de Planeamiento de Sistemas Eléctricos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Almeida, M.S., Mantovani, J.R.S., Romero, R.A.: "Colocación Óptima de Subestaciones y Alimentadores en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Branch and Bound", XIV Congreso Brasileño de Automatización, Natal-Brasil, Septiembre 2002.
- [2] Bazán, F.A., Mantovani, J.R.S., Romero, R.A.: "Planeamiento de Expansión de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Búsqueda Tabú", XIV Congreso Brasileño de Automatización, Natal-Brasil, Septiembre 2002.
- [3] Kagan, N., Adams, R.N.: "A Benders Decomposition Approach to the Multiobjective Distribution Planning Problem", *Internacional Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 15, No. 5, pp259-271.
- [4] Kagan, N.: "Electrical Distribution Systems Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming", Tesis Doctoral, Departamento De Ingeniería Electrónica, Universidad de Londres.
- [5] Ponnavaiko et al.: "Distribution System Planning Trough Mixed Integer Programming Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 4, pp1157-1163.
- [6] Ramírez-Rosado, I.J., Bernal-Agustín, J.L.: "Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13 No. 2, pp696-703, May 1998.
- [7] R. A. Hincapié, M. Granada, R. A. Gallego.: "Planeamiento de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando Branch and Bound", *Revista Ingeniería y Competitividad*, Universidad del Valle, en revisión, 2005.