

PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO BÚSQUEDA TABÚ

RESUMEN

El problema del planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica trata la adecuada expansión del sistema, para satisfacer la demanda de los usuarios, cumpliendo con los límites técnicos y operativos, a un mínimo costo. En este artículo se presenta un modelo no lineal resuelto usando la metodología de búsqueda tabú. La metodología propuesta fue verificada con un sistema de prueba de 50 nodos tomado de literatura especializada, el cual presentó excelentes resultados.

PALABRAS CLAVES: planeamiento de la distribución, modelamiento matemático, sistemas de distribución de energía, optimización combinatorial, búsqueda tabú.

ABSTRACT

Distribution system planning problem deals about the expansion of system, in order to satisfy the demand, accomplish the technical and operative limits with a minimal cost. This paper shows the solution of the planning expansion problem in power distribution systems using Tabu search technique. The proposed methodology was verified using a 50 nodes system tooked from specialized literature, wich presents excellents results

KEYWORDS: *distribution system planning, mathematical model, distribution systems, combinatorial optimization, tabu search.*

1. INTRODUCCIÓN

La expansión de los sistemas de distribución de energía eléctrica busca garantizar el continuo suministro de energía eléctrica por parte de las empresas prestadoras del servicio a los usuarios, teniendo en cuenta la expansión de los sistemas de distribución, estudio del crecimiento de la demanda de la energía eléctrica y la adecuada expansión del sistema, con el objetivo de garantizar la continuidad del servicio eléctrico, manteniendo la viabilidad económica de las empresas y un mínimo costo en la tarifa de la energía para el usuario.

El problema del planeamiento de la distribución puede ser planteado con el objetivo de minimizar el costo total del plan de expansión, que incluye los costos de inversión en líneas y subestaciones y los costos asociados a las pérdidas de energía en el sistema a lo largo del horizonte de planeamiento, manteniendo las restricciones técnicas del sistema. El horizonte de planeamiento es el tiempo considerado para efectuar el plan de expansión del sistema. Dentro de este tiempo se considera el crecimiento de la demanda existente, así como la aparición de nuevos centros de consumo.

Las opciones de expansión del sistema consisten en repotenciar las subestaciones y líneas existentes, ubicar y dimensionar nuevas subestaciones, localizar y dimensionar nuevas líneas y modificar la topología del sistema (reconfiguración). Siguiendo estas opciones de expansión, para el problema del planeamiento de la distribución se proponen modelos lineales y no lineales

LUCAS PÉREZ HERNÁNDEZ.

Ingeniero Electricista,
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
lucaspaulp@gmail.com

JOHN FREDY FRANCO B.

Ingeniero Electricista,
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
jffb@utp.edu.co

RAMÓN A. GALLEGO R.

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

Grupo de planeamiento en sistemas eléctricos

con variables enteras y continuas, siendo considerado un problema de alta complejidad matemática, del tipo NP completo, con un espacio de búsqueda grande debido al número de combinaciones posibles de las opciones mencionadas. El planeamiento de la expansión del sistema de distribución se ha abordado con técnicas heurísticas, técnicas de programación lineal, técnicas de optimización entera, siendo estas reservadas a problemas de tamaño mediano, y técnicas de optimización combinatorial como algoritmos genéticos y búsqueda tabú, aplicadas a sistemas reales de gran tamaño.

En [1] se trata el problema bajo un modelamiento entero mixto, con el método de solución de Branch and Bound; los costos se toman lineales y las caídas de tensión son incluidas, siendo usado un modelo de cargas del tipo corriente constante. En [2] se usan los algoritmos genéticos para solucionar el problema del planeamiento de la distribución. Se utiliza un modelo multietapa, considerando los costos de inversión en subestaciones y alimentadores y los costos no lineales de operación. Las restricciones son la primera ley de Kirchhoff, los límites de capacidad en subestaciones y alimentadores, las caídas de tensión en los nodos y la restricción de radialidad. Esta metodología obtiene configuraciones óptimas para sistemas de distribución de tamaño real en tiempos de cómputo razonablemente pequeños, siendo el trabajo que usaba sistemas de prueba más grandes (alrededor de 200 nodos). El algoritmo genético usado es una propuesta donde los operadores de recombinación y mutación fueron aplicados para encontrar la solución óptima o en su defecto una muy cercana. Se usó una codificación

binaria. Se proponen distintos tipos de líneas y capacidades en las subestaciones y teniendo también en cuenta la confiabilidad del sistema como objetivo.

En este artículo se desarrolla una metodología para la solución del problema del planeamiento de la expansión de sistemas de distribución, bajo un modelamiento no lineal, aplicando la técnica de optimización combinatorial Búsqueda Tabú, para encontrar soluciones de excelente calidad, que representen mínimos costos totales en el sistema y satisfagan las restricciones consideradas. La metodología propuesta fue verificada con un sistema de prueba encontrado en la literatura especializada.

2. EL PROBLEMA DEL PLANEAMIENTO DE LA DISTRIBUCIÓN

Considerando que se cuenta con la estimación del crecimiento de la demanda sobre el horizonte de planeamiento, se debe determinar el plan de expansión óptimo del sistema. Las opciones consideradas en el plan de expansión son:

- La repotenciación de subestaciones existentes.
- La ubicación y dimensionamiento de nuevas subestaciones.
- La repotenciación de alimentadores existentes.
- La localización y selección de nuevos alimentadores.
- Modificación de la topología del sistema (reconfiguración).

Desde el punto de vista de operación, el plan de expansión propuesto debe cumplir con las siguientes restricciones:

- Primera ley de Kirchhoff (balance de corrientes nodales).
- Segunda ley de Kirchhoff (suma de voltajes en trayectorias cerradas).
- Capacidad de potencia en subestaciones y alimentadores.
- Límites mínimos y máximos de tensión en los nodos.
- Radialidad del sistema.

El modelo matemático usado es propuesto en [7] [8]. El objetivo del planeamiento es proponer un plan de expansión con un mínimo costo cumpliendo con las restricciones técnicas y de operación. La función objetivo tiene entonces dos componentes: costos de inversión, que se conocen como los costos fijos, y los costos de pérdidas, que se conocen como los costos variables.

En la función objetivo se consideran los siguientes costos de inversión:

- Costo de aumentar la capacidad de las subestaciones existentes.
- Costo de inversión en subestaciones nuevas.
- Costo de repotenciación (aumento de calibre del conductor) en alimentadores existentes.
- Costo de construcción de nuevos alimentadores.

$$\min z = \sum_{(i,j) \in N_F} \sum_{a \in N_a} \left\{ (CF_{ij})_a (Y_{ij})_a + (CV_{ij})_a \left[(S_{ij})_a^2 + (S_{ji})_a^2 \right] \right\} + \sum_{h \in N_s} \sum_{b \in N_b} \left[(CF_h)_b (Y_h)_b + (CV_h)_b (S_h)_b^2 \right]$$

s.a.

$$f + Z^{-1} \cdot A \cdot V = 0 \quad A^T \cdot f = d$$

$$0 \leq (S_{ij})_a \leq (U_{ij})_a (Y_{ij})_a \quad 0 \leq (S_{ji})_a \leq (U_{ji})_a (Y_{ij})_a \quad (1)$$

$$0 \leq (S_h)_b \leq (U_h)_b (Y_h)_b$$

$$\sum_{a \in N_a} (Y_{ij})_a \leq 1 \quad \forall (i, j) \in N_F \quad \sum_{b \in N_b} (Y_h)_b \leq 1 \quad \forall h \in N_F$$

$$\sum_{(i,j) \in N_F} \sum_{a \in N_a} (Y_{ij})_a < n - n_{\text{aislados}} - \sum_{h \in N_s} \sum_{b \in N_b} (Y_h)_b$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad \forall i \in N$$

$$(Y_{ij})_a, (Y_h)_b \text{ binario} \quad (S_{ij})_a, (S_h)_b \text{ irrestricto}$$

donde:

N_{FE} : conjunto de rutas (entre nodos) asociadas con alimentadores existentes

N_{FN} : conjunto de rutas propuestas (entre nodos) para construir

$$N_F: N_{FE} \cup N_{FN}$$

N_a : conjunto de posibles tipos de alimentadores

N_{SE} : conjunto de nodos asociados a subestaciones existentes

N_{SN} : conjunto de nodos asociados a subestaciones propuestas

$$N_s: N_{SE} \cup N_{SN}$$

N_b : conjunto de posibles tipos de subestaciones

V_{\min} : mínimo valor de tensión permitido

V_{\max} : máximo valor de tensión permitido

$(S_{ij})_a$: flujo de potencia entre los nodos $i - j$ para el alimentador tipo a

$(S_h)_b$: flujo de potencia en la S/E del nodo h para S/E tipo b

$(CF_h)_b$: costo fijo subestación tipo b en el nodo h

$(CF_{ij})_a$: costo fijo alimentador tipo a entre los nodos $i - j$

$(CV_h)_b$: costo variable subestación tipo b en el nodo h

$(CV_{ij})_a$: costo variable alimentador tipo a entre los nodos $i - j$

f : vector de flujo de corrientes por los alimentadores

V : vector de tensiones en los nodos

Z : matriz diagonal de impedancias de las ramas

A : matriz incidencia rama - nodo

d : vector de demandas nodales

$(U_{ij})_a$: capacidad de potencia alimentador tipo a entre los nodos $i - j$

$(U_h)_b$: capacidad de potencia subestación tipo b en el nodo h

n : número de nodos del sistema

n_{aislados} : número de nodos aislados presentes en la configuración del sistema

$(Y_{ij})_a$: variable de decisión construcción alimentador tipo a entre los nodos $i - j$

$(Y_h)_b$: variable de decisión construcción subestación tipo b en el nodo h

3. BÚSQUEDA TABÚ

3.1. Generalidades

Búsqueda Tabú [3], [4] es una técnica de optimización combinatorial que proviene de la inteligencia artificial y usa conceptos de memoria adaptativa y exploración sensible. Un algoritmo de Búsqueda Tabú completo utiliza técnicas de exploración y de memoria avanzadas, como lo son: memoria de corto y largo plazo, estrategias de intensificación, diversificación, oscilación estratégica, path relinking y lista de configuraciones de élite, entre otras [4].

3.2. Función Objetivo

Esta técnica resuelve problemas del tipo (2):

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & x \in X \end{aligned} \quad (2)$$

Donde f es una función general, lineal o no lineal, y X es un conjunto de restricciones que pueden ser lineales o no lineales también. Las variables x pueden ser de naturaleza continua o entera o mixta. La exploración sensible de Búsqueda tabú se basa en la idea de que una mala decisión hecha por una estrategia produce más información que una buena selección hecha de forma aleatoria.

3.2. Aspectos básicos de Búsqueda Tabú

Configuración inicial.

La configuración inicial puede ser obtenida aleatoriamente, por medio de un algoritmo constructivo o alguna técnica heurística que utilice índices de sensibilidad. Una configuración aleatoria puede tener la ventaja de que evita una convergencia prematura, pero una configuración inicial de mala calidad conduce a un esfuerzo computacional mayor. Una buena configuración inicial encontrada usando un constructivo puede estar en una región promisoría.

Generación del vecindario.

Un vecino de una configuración X es una configuración X' obtenida a partir de X por medio de una transición simple. Siendo que en la mayoría de los casos el vecindario $N(X)$ puede ser muy grande lo que implica un elevado esfuerzo de cómputo en el proceso de búsqueda local, se debe reducir el número de vecinos a un conjunto $N^*(X)$ más pequeño que $N(X)$, redefiniendo el vecindario. Se tienen diferentes formas de reducir el vecindario:

- Tomar un número determinado de configuraciones seleccionadas aleatoriamente del conjunto $N(X)$.
- Aspiración adicional. Se utiliza algún criterio como puede ser la reducción de la función objetivo hasta cierto valor. Cuando se encuentra una configuración que cumpla la condición, se evalúan otras

configuraciones adicionales. Se debe fijar un número mínimo y máximo de configuraciones a ser analizadas.

- Lista de reducción de candidatos de élite. Se selecciona un conjunto de configuraciones vecinas con atributos particulares, las cuales son llamadas configuraciones de élite.

Selección del mejor vecino.

Se evalúa cada vecino, se determina su función objetivo y se verifica si cumple las restricciones del problema a resolver, para determinar la factibilidad de la configuración vecina. Los vecinos son clasificados en una lista de acuerdo al valor de la función objetivo y el proceso selecciona el mejor candidato.

El primer candidato de la lista (de mejor función objetivo) es seleccionado si el movimiento efectuado para pasar de la configuración actual a la configuración vecina no se encuentra prohibido (estado tabú) y si es factible, este modo de selección se denomina selección agresiva la cual imita las características de un algoritmo goloso. Si el mejor vecino de la lista de candidatos esta clasificado como tabú por el proceso de optimización, el criterio de aspiración permite que sea seleccionado a pesar de la prohibición, si la configuración analizada mejora la configuración incumbente (mejor solución encontrada hasta el momento por el proceso). Si en el vecindario generado no existe ninguna configuración que mejora la función objetivo, entonces es seleccionada la mejor de las peores pero que no haya sido clasificada como tabú durante el proceso de optimización. Esta estrategia evita que se quede atrapado en óptimos locales.

Actualización de la estructura tabú.

Búsqueda Tabú usa una estructura que tiene la misma codificación de la configuración X , para almacenar la información de los atributos que han cambiado o que han permanecido sin cambio alguno en el proceso de búsqueda. Esta información se almacena en las memorias de corto y largo plazo, las cuales pueden tener un criterio de almacenamiento fijo o variable a lo largo del proceso dependiendo del comportamiento de la búsqueda. Esto es lo que constituye la memoria adaptativa. La memoria usada en Búsqueda Tabú puede ser explícita o por atributos [4]. La memoria explícita almacena la información completa de configuraciones élite (configuraciones de buena calidad) encontradas durante la búsqueda. La memoria basada en atributos almacena la información de los atributos que cambian al pasar de una configuración a otra, presentando como ventajas la facilidad de almacenamiento, manipulación y verificación. Con esto, se evita regresar a configuraciones ya visitadas, lo cuál es ventajoso; pero también se podrían dejar de visitar regiones no visitadas que tengan atributos prohibidos de aquellas ya exploradas.

alimentadores existentes y propuestos, de los tipos de líneas y subestaciones se encuentran en [16]. El costo CR es el costo de repotenciación que se usa en lugar del costo fijo si la línea o la subestación son existentes.

Se proponen dos nuevas subestaciones para abastecer la demanda. La metodología determina si estas subestaciones propuestas entran a formar parte de la configuración final del planeamiento. En las tablas 1 y 2 se muestran los tipos de líneas y de subestaciones disponibles para realizar el planeamiento del sistema.

Tipo	R [Ω/km]	X [Ω/km]	kVA max	CF [M\$/km]	CV [\$/kVA ² /km]	CR [M\$/km]
1	0.3655	0.252	9000	70	13.39	30
2	0.2921	0.2466	11000	100	10.70	40
3	0.2359	0.2402	12500	110	8.64	50
4	0.1932	0.2279	14000	120	7.08	60
5	0.1827	0.126	19000	135	6.70	70
6	0.146	0.1233	22400	150	5.35	80
7	0.118	0.1201	25000	160	4.32	90
8	0.0966	0.114	28000	180	3.54	100

Tabla 1. Tipos de línea Sistema 50 nodos.

Tipo	kVA max	CF [M\$]	CV [\$/kVA ²]	CR [M\$]
1	20000	4000	0	1000
2	30000	6000	0	1100
3	40000	8000	0	1200

Tabla 2. Tipos de subestaciones Sistema 50 nodos.

En la figura 3 se muestra la configuración inicial del sistema antes del planeamiento y en la figura 4 se muestra la solución de planeamiento propuesta. El sistema obtenido es radial y no se presentan sobrecargas en líneas o subestaciones. Las tensiones en los nodos permanecen en el intervalo permitido (0.95 pu a 1.05 pu). En la tabla 4 se presentan los resultados de las líneas para el planeamiento estático. Las líneas que quedan fuera del sistema son aquellas en las que aparece "-1" en la columna Tipo. En los nodos 53 y 54 se agregan nuevas subestaciones del tipo 1, que permiten descargar las subestaciones 51 y 52, de tal forma que no se superen sus límites de capacidad y al la vez el costo por pérdidas disminuye.

Costo total (M\$)	40931
Costo variable líneas (M\$)	9697
Costo fijo líneas (M\$)	23234
Costo fijo S/E (M\$)	8000

Tabla 3. Resultados económicos sistema 50 nodos.

Envío	Recibo	Tipo	Envío	Recibo	Tipo
51	1	8	6	28	-1
51	3	8	54	30	8
3	4	8	30	29	8
4	7	8	30	43	8
4	5	8	43	37	8
7	8	8	31	37	8
5	6	8	10	31	-1
1	9	8	13	43	-1
1	2	8	12	45	8
9	10	8	45	44	8
52	14	8	44	38	8
14	15	8	38	39	-1
15	16	8	39	32	8
52	11	8	33	39	8
11	12	8	8	33	-1
12	13	8	33	34	8
19	20	8	34	35	8
18	19	8	35	36	8
17	18	8	53	36	8
9	17	-1	28	53	8
18	21	8	53	41	8
54	21	8	40	41	8
22	54	8	16	40	-1
9	22	-1	41	42	8
22	23	8	42	48	8
23	24	8	48	49	8
24	25	8	49	50	8
8	25	-1	47	42	-1
8	27	-1	46	47	8
27	26	8	14	46	8
27	28	8			

Tabla 4. Resultados sistema 50 nodos.

5. CONCLUSIONES

La técnica Búsqueda Tabú aplicada para resolver el problema mostró ser una herramienta efectiva y poderosa para tratar problemas del tipo combinatorial. En particular esta técnica es aplicable en sistemas de distribución para los problemas de reconfiguración, ubicación de condensadores, reguladores y elementos de protección, entre otros. La metodología propuesta puede ser usada para efectuar un planeamiento estático o por etapas pseudodinámico, donde la solución final tiene un costo total mínimo, cumpliendo con las restricciones de radialidad, límites de capacidad y límites de tensión. Además de la solución principal y aprovechando las características de Búsqueda Tabú, se encuentran otras configuraciones de buena calidad (configuraciones élite) con características diferentes a la principal, que pueden ser opciones válidas para el diseño futuro de la red. Al trabajar con un modelo no lineal que toma costos variables no lineales, se están modelando de forma real

las pérdidas de energía en el sistema, en lugar de usar una aproximación lineal, por lo que la solución del modelo matemático se ajusta mejor a la solución del problema real de planeamiento de sistemas de distribución. El flujo de carga Barrido Iterativo para sistemas de distribución utilizado fue una herramienta apropiada y eficiente para facilitar la evaluación de la función objetivo de cada configuración analizada y verificar el cumplimiento de las restricciones operativas. Como futuros trabajos se puede tratar el problema del planeamiento óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica con una metodología dinámica, donde se tenga un planeamiento coordinado entre las distintas etapas, lo cuál llevaría a mejores resultados. Otro aspecto que se puede tener en cuenta es incluir la confiabilidad del sistema en el modelo del planeamiento. De tal forma que a la par que se minimicen los costos totales del plan de expansión, se considere la confiabilidad de la red atendiendo los índices de calidad exigidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] HINCAPIÉ ISAZA, R. A. "Planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de Branch and Bound", Tesis de Maestría Universidad Tecnológica de Pereira, 2004.
- [2] BERNAL AGUSTÍN, J. L. "Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica", Tesis Doctoral Universidad de Zaragoza, 1998.
- [3] GLOVER, F., "Tabu Search Fundamentals and Uses", University of Colorado, Boulder, Colorado, April 1995.
- [4] BAZAN, F. A. "Planeamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo busca tabu", Tesis de Maestría, Universidade Estadual Paulista, 2003.
- [5] BURANI, G. F., "Planeamento da expansao da distribucao primária com aplicacao de técnicas de transporte", X Seminario Nacional de Distribucao de Energía Eléctrica, Río de Janeiro, Oct. 1998.
- [6] DÍAZ-DORADO, E. y MÍGUEZ, E. "Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of médium voltage". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17 No. 3, 2002.
- [7] FRANCO; J. F., et al. "Modelamiento matemático del problema del planeamiento de la expansión de sistemas de distribución" Scientia et Technica Año XII, No 32, Diciembre de 2006. UTP.
- [8] FRANCO; J. F. "Planeamiento de sistemas de distribución usando Busqueda Tabu", Tesis de Maestría Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [9] GALLEGO, R., ESCOBAR, A., ROMERO, R. "Técnicas de optimización combinatorial", Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [10] GONEN, T. y FOOTE, B. L. "Distribution system planning using mixed integer programming", Proceedings IEEE, Vol. 128, Part. C, p.p. 70-79.
- [11] HAFFNER, S et al. "Optimization model for expansion planning of distribution systems". 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition:Latin America.
- [12] KAGAN, N. "Electrical Distribution System Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming", PhD Thesis, University of London. 1992.
- [13] KHATOR, S. y LEUNG, L. C. "Power distribution planning: a review of models and issues". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12 No. 3, 1997.
- [14] MIRANDA, V., RANITO, J. V., PROENÇA, L. M. "Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9 No. 4, 1994.
- [15] PROENÇA, L.M., MIRANDA, V., RANITO J.V. "Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning", IEEE Transactions on Power Systems, PWRS-9 (4), 1993.
- [16] RAMIREZ ROSADO, I. J. y BERNAL-AGUSTÍN J. L. "Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13 No. 2, 1998.
- [17] <http://www.gpsis.utp.edu.co/~jfranco/PSD/SP50n.txt>

Figura 3. Red inicial sistema de prueba 50 nodos.

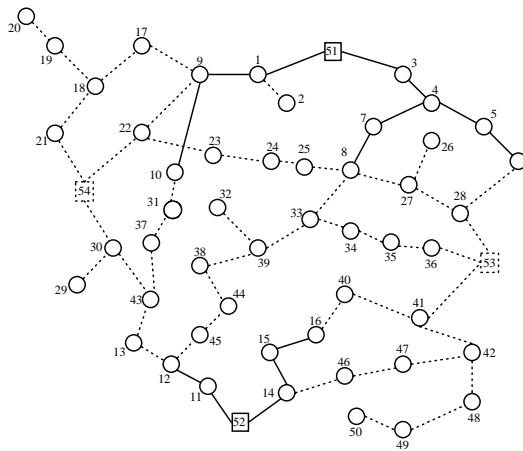


Figura 4. Planeamiento estático sistema de prueba 50 nodos.

