

# **PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA UTILIZANDO BÚSQUEDA TABÚ**

***ANDRÉS CAMILO SANTACRUZ CABRERA***

***CHRISTIAN CAÑAVERAL OSORIO***

**Programa de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingenierías  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Pereira, 2014**

# **PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA UTILIZANDO BÚSQUEDA TABÚ**

**ANDRÉS CAMILO SANTACRUZ CABRERA**

**CHRISTIAN CAÑAVERAL OSORIO**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**Director:** Harold Salazar Isaza, PhD.

**Co-director:** Carlos Arturo Saldarriaga Cortes, MSc.

**Programa de Ingeniería Eléctrica**

**Facultad de Ingenierías**

**Universidad Tecnológica de Pereira**

**Pereira, Junio de 2014**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **DEDICATORIA**

**“A mi familia y en especial a mi madre, por su esfuerzo y por el constante apoyo brindado a lo largo de mi formación personal y profesional. A mi compañero Christian por el trabajo realizado en el presente proyecto”. Andrés.**

**“A mis padres y hermanos por su paciencia y apoyo. A Andrés Santacruz mi compañero, por tanto tiempo de trabajo y dedicación en este proyecto.**

**A Laura, Alex y a todos mis compañeros de estudio, por compartir Tantas experiencias”. Christian.**

## ***Agradecimientos.***

A los profesores Harold Salazar y Carlos Saldarriaga, por compartirnos sus conocimientos, por su acompañamiento, por su constante apoyo, sus orientaciones, su colaboración y por ser los guías en la realización del presente trabajo.

A todos los profesores del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, por los conocimientos adquiridos, por permitirnos crecer tanto académica como personalmente y por contribuir en nuestra formación profesional.

A nuestros compañeros del grupo de investigación Geovanny y Juan Guillermo, así como al profesor Ricardo Hincapié por su colaboración en las diferentes etapas de este proyecto.

## ***Tabla de Contenido.***

1. Introducción.....	1
2. Descripción del problema.....	3
2.1. Función objetivo.....	4
2.2. Restricciones.....	6
2.3. Modelo matemático.....	8
3. Búsqueda tabú (Tabú Search-TS).....	10
3.1. Introducción a las técnicas heurísticas y metaheurísticas.....	10
3.1.1. Generalidades de problemas de optimización matemática..	10
3.1.2. Algoritmos heurísticos.....	11
3.1.3. Técnicas metaheurísticas.....	12
3.2. Generalidades de Tabu Search.....	13
3.2.1. Introducción a TS.....	13
3.2.2. Configuración inicial.....	14
3.2.3. Codificación y vecindad.....	14
3.2.4. Listas tabú y criterios de aspiración.....	15
3.3. Memorias y estrategias de Tabu Search.....	17
3.3.1. Memorias de corto y largo plazo.....	17
• Memoria de corto plazo.....	17
• Memoria de largo plazo.....	17
• Memoria basada en frecuencia.....	18
• Estrategia de intensificación.....	18
• Estrategia de diversificación.....	19
3.3.2. Oscilación estratégica.....	19
3.3.3. Encadenamiento de trayectorias.....	19
4. TS aplicado al planeamiento de la distribución con GD.....	22
4.1. Generalidades.....	22
4.2. Algoritmo esclavo.....	24
4.3. Algoritmo maestro.....	25
4.3.1. Lista de configuraciones élite para generación (SEs y GDs).....	26
4.3.2. Algoritmo heurístico constructivo para obtener la configuración inicial de alimentadores.....	28
4.3.3. Maestro.....	29
4.3.4. Post-optimización.....	32
5. Resultados numéricos.....	33
5.1. Sistema de prueba I – 12 nodos.....	33
5.1.1. Descripción del sistema.....	33
5.1.2. Resultados.....	35
5.1.3. Análisis de resultados.....	38
5.2. Sistema de prueba II – 54 nodos.....	39

5.2.1. Descripción del sistema.....	39
5.2.2. Resultados.....	41
• Etapa 1.....	41
• Etapa 2.....	43
5.2.3. Análisis de resultados.....	45
• Análisis.....	45
• Comparación con otros algoritmos.....	46
6. Conclusiones.....	49
7. Bibliografía.....	51
8. Anexos.....	53
8.1. Anexo 1: Datos sistema de prueba I.....	53
8.2. Anexo 2: Datos sistema de prueba II.....	56

## *Índice de Figuras.*

<b>Figura 1.</b> Mecanismo de transición de TS.....	16
<b>Figura 2.</b> Diagrama de bloques Tabu Search.....	21
<b>Figura 3.</b> Diagrama de bloques del algoritmo.....	23
<b>Figura 4.</b> Codificación para alimentadores.....	30
<b>Figura 5.</b> Sistema de prueba 12 nodos.....	34
<b>Figura 6.</b> Discretización curva de duración de carga.....	35
<b>Figura 7.</b> Propuesta de planeamiento sistema de prueba 12 nodos.....	37
<b>Figura 8.</b> Sistema de prueba 54 nodos.....	40
<b>Figura 9.</b> Propuesta de planeamiento sistema 54 nodos, etapa I.....	42
<b>Figura 10.</b> Propuesta de planeamiento sistema 54 nodos, etapa II.....	44



## ***Índice de Tablas.***

<b>Tabla 1.</b> Niveles de carga.....	34
<b>Tabla 2.</b> Parámetros algoritmo de TS sistema de prueba 12 nodos.....	35
<b>Tabla 3.</b> Relación de costos propuesta de planeamiento sistema 12 nodos....	37
<b>Tabla 4.</b> Parámetros algoritmo de TS sistema de prueba 54 nodos, etapa 1...	41
<b>Tabla 5.</b> Costos propuesta de planeamiento sistema 54 nodos, etapa 1.....	42
<b>Tabla 6.</b> Parámetros algoritmo de TS sistema de prueba 45 nodos, etapa 2...	43
<b>Tabla 7.</b> Costos propuesta de planeamiento sistema 54 nodos, etapa 2.....	44
<b>Tabla 8.</b> Relación de costos sistema de prueba 2 (Millones de dólares).....	47

## *Índice de Ecuaciones.*

<b>Ecuación 1.</b> Función objetivo del problema.....	4
<b>Ecuación 2.</b> Costo de alimentadores.....	5
<b>Ecuación 3.</b> Costo de subestaciones.....	5
<b>Ecuación 4.</b> Costo de generadores distribuidos.....	5
<b>Ecuación 5.</b> Costos operativos.....	6
<b>Ecuación 6.</b> Restricción balance de potencia nodal.....	7
<b>Ecuación 7.</b> Restricción límite de corriente.....	7
<b>Ecuación 8.</b> Restricción capacidad máxima subestaciones.....	7
<b>Ecuación 9.</b> Restricción capacidad máxima generadores.....	7
<b>Ecuación 10.</b> Restricción límites de tensión en los nodos.....	7
<b>Ecuación 11.</b> Restricción número de subestaciones por nodo.....	7
<b>Ecuación 12.</b> Restricción número de generadores por nodo.....	7
<b>Ecuación 13.</b> Restricción número de alimentadores por tramo de red.....	7
<b>Ecuación 14.</b> Restricción de radialidad.....	7
<b>Ecuación 15.</b> Modelo matemático de optimización.....	9
<b>Ecuación 16.</b> Modelo general de un problema de optimización.....	11
<b>Ecuación 17.</b> Función objetivo modelo matemático flujo de potencia óptimo...	24
<b>Ecuación 18.</b> Restricciones modelo matemático flujo de potencia óptimo.....	25

# 1. Introducción.

---

El planeamiento de la expansión de los sistemas de distribución es de vital importancia para el análisis de sistemas eléctricos, pues permite encontrar la topología más adecuada y económica que se adapte a criterios técnicos y operativos, a través de la utilización de diversos modelos y técnicas matemáticas exactas y no exactas. Cada vez el análisis de dichos sistemas se vuelve más complejo, pues se deben incorporar una mayor cantidad de variables con el fin de acercarse más a lo que sucede en los sistemas reales: aspectos como la coordinación de protecciones, la necesidad de utilización de energías limpias para la generación de energía, los impactos en los niveles de confiabilidad y regulación de tensión en la red, la contribución en los niveles de pérdidas de potencia, entre otras situaciones pueden ser consideradas en el análisis, según sea la finalidad del modelo de planeamiento.

Un aspecto importante a considerar es la utilización de generación distribuida (GD) con fines tan diversos como abastecer parte de la demanda de la red, aumentar confiabilidad, mejorar perfiles de tensión, minimizar los niveles de pérdidas, entre otras. “En particular el término GD se entiende como la utilización de generadores instalados en el territorio próximo a las cargas y conectados a las redes de distribución. Dichas unidades pueden ser convencionales o no convencionales” [1]. Las unidades de GD convencionales pueden utilizar como materia prima combustibles fósiles, mientras que las unidades no convencionales reúnen las denominadas energías renovables tales como la eólica, la solar térmica, la solar fotovoltaica, la biomasa, mareomotriz, undimotriz, entre otras. La GD a partir de energías alternativas presenta además la ventaja de disminuir los índices de contaminación ambiental y mejorar la calidad de vida de las personas [2].

Debido a las ventajas que trae consigo la GD mencionadas anteriormente, se hace necesario que dentro del modelo de planeamiento de los sistemas de distribución se incluyan éstas unidades y que el planeamiento de las mismas se realice a la par con el resto de elementos del sistema, con el fin de minimizar los costos de inversión y operativos a lo largo del periodo o periodos de planeamiento. El planeamiento puede ser orientado a minimizar los costos totales del plan de expansión para el sistema, los cuales incluirían costos de inversión en nuevos alimentadores, subestaciones (SEs) y unidades de GD, costos de repotenciación

de elementos existentes en la red tales como alimentadores, SEs o GDs y costos asociados a las pérdidas de energía del sistema. “El horizonte de planeamiento hace referencia el tiempo considerado para efectuar la expansión del sistema; dentro de este tiempo se considera el crecimiento de la demanda existente, así como la aparición de nuevos centros de consumo” [1]. Además, el planeamiento puede ser considerado en un solo periodo proyectando las demandas hasta el final del horizonte de planeamiento (mono etapa) o dividiendo el horizonte de planeamiento y la proyección de la demanda en varios sub-periodos de tiempo (multietapa). El planeamiento multietapa presenta la ventaja de que se reduce el error presente en la predicción de la demanda en largos periodos de tiempo.

En este trabajo se presenta una metodología de solución al problema de planeamiento de sistemas de distribución con penetración de GD, implementada a través de un algoritmo de búsqueda tabú (TS), el cual proporcionará soluciones factibles de buena calidad para el problema en cuestión.

En el capítulo 2 se presenta una descripción del modelo matemático que tiene el problema de optimización no lineal entero mixto que representa el problema de planeamiento con generación distribuida. Se presenta la función objetivo que se requiere minimizar, la cual viene dada por una función de costos y se presentan además las restricciones técnicas y operativas del problema. En el capítulo 3, se realiza una descripción de los principales elementos de TS, enfatizando en los elementos de la técnica que se utilizan para implementar el algoritmo que dará solución al problema. Posteriormente, en el capítulo 4 se realiza una descripción de cómo se implementó el algoritmo de TS al problema del planeamiento de sistemas de distribución con GD. Después, en el capítulo 5 se realiza una descripción de los sistemas de prueba que se utilizaron para probar el rendimiento del algoritmo, así como de los resultados obtenidos y el análisis de los mismos.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la aplicación del algoritmo implementado a los sistemas de prueba. La bibliografía y los anexos correspondientes a los valores técnicos de los sistemas de prueba se muestran en los capítulos 7 y 8, respectivamente.

## 2. Descripción del Problema.

---

El planeamiento de sistemas de distribución consiste en determinar los cambios necesarios en el sistema para atender la demanda creciente. “El estudio del crecimiento de la demanda requiere una proyección de las cargas de acuerdo con características como el tipo de carga y alimentador respectivo, así como el crecimiento particular de la zona donde se ubica la carga, teniendo en cuenta también aspectos económicos como crecimiento del producto interno bruto, aumento de la población y por ende del consumo. Este análisis se realiza usando herramientas estadísticas y de predicción” [3]. En este trabajo se considera que se cuenta con la estimación de la demanda a lo largo del periodo de planeamiento. El problema de planeamiento de sistemas de distribución convencional se enfoca en minimizar los costos de inversión y de operación de la red eléctrica a lo largo del periodo de planeamiento. En éste caso, adicional al problema de planeamiento convencional, se incluye en el modelo la planificación óptima de los sistemas de generación distribuida, los cuales estarán inmersos en la red de distribución y ayudaran en parte a suplir la demanda de energía de la misma. La topología encontrada como solución debe satisfacer una serie de restricciones técnicas y operativas; éstas se detallan más adelante.

El modelo considera que se parte de una red existente, por lo que además de costos de inversión en nuevos elementos, se tienen costos de repotenciación de las unidades existentes. De esta forma, se tendrán costos de inversión y repotenciación asociados a las unidades de generación distribuida, las subestaciones y los alimentadores de la red. Por otra parte, se consideran los costos operativos de la red, esto es, los costos asociados a las pérdidas de energía inherentes a cualquier red eléctrica. En términos matemáticos, el planeamiento de sistemas de distribución con penetración de generación distribuida se considera un problema de programación no lineal entero-mixto. El modelo matemático a utilizar, se toma de la referencia [4] y se adapta para el caso específico del problema a solucionar.

## 2.1. Función objetivo.

La función objetivo corresponde a minimizar los costos de inversión, repotenciación y operativos del planeamiento de la red de distribución con penetración de generadores distribuidos. Dicha función se muestra en la ecuación 1. La función objetivo tiene cuatro componentes, asociados a alimentadores ( $C_t^1$ ), subestaciones SE's ( $C_t^2$ ), generadores distribuidos GD's ( $C_t^3$ ) y pérdidas en las líneas ( $C_t^4$ ), respectivamente.

$$OF = \sum_{t=1}^{nS} \beta^{(t-1)nT} (C_t^1 + C_t^2 + C_t^3 + C_t^4) \quad (1)$$

En donde:

$nS$  : Número de periodos de planeamiento

$\beta$  : Factor de descuento

$nT$  : Duración de cada periodo de planeamiento en años

El factor beta ( $\beta$ ) es un factor que permite traer a valor presente los costos obtenidos para las inversiones en valor futuro, pues cuando el periodo de planeamiento está dividido por etapas, la inversión para las etapas diferentes a la primera se hacen una vez haya transcurrido el tiempo de las etapas anteriores.

En las ecuaciones (2), (3) y (4) se muestran los costos asociados a alimentadores, SEs y GDs respectivamente, los cuales corresponden a los tres primeros términos de la ecuación (1). En general cada una de las ecuaciones (2), (3) y (4) tiene dos componentes que poseen una doble sumatoria cada uno. El primer componente corresponde a la instalación de nuevos elementos (N: nuevo) mientras que el segundo está asociado con el aumento en la capacidad de elementos existentes (R: repotenciación).

$$C_t^1 = \sum_1^{\text{n}^\circ \text{l\u00edneas propuestas}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos l\u00edneas}} (C_{N-A} \cdot \sigma_{N-A}) + \sum_1^{\text{n}^\circ \text{l\u00edneas existentes}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos l\u00edneas}} (C_{R-A} \cdot \sigma_{R-A}) \quad (2)$$

$$C_t^2 = \sum_1^{\text{n}^\circ \text{SEs propuestas}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos SEs}} (C_{N-SE} \cdot \sigma_{N-SE}) + \sum_1^{\text{n}^\circ \text{SEs existentes}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos SEs}} (C_{R-SE} \cdot \sigma_{R-SE}) \quad (3)$$

$$C_t^3 = \sum_1^{\text{n}^\circ \text{GDs propuestos}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos GDs}} (C_{N-GD} \cdot \sigma_{N-GD}) + \sum_1^{\text{n}^\circ \text{GDs existentes}} \sum_1^{\text{n}^\circ \text{tipos GDs}} (C_{R-GD} \cdot \sigma_{R-GD}) \quad (4)$$

En las tres ecuaciones anteriores los sub \u00edndices *A*, *SE* y *GD* corresponden a “alimentadores”, “subestaciones” y “generadores distribuidos”, respectivamente. De igual forma, los sub \u00edndices *N* y *R* corresponden a “elemento nuevo” y “repotenciar elemento existente”, respectivamente. Adem\u00e1s, la letra *C* hace referencia al costo de inversi\u00f3n o repotenciaci\u00f3n de alguno de los elementos, mientras que la letra  $\sigma$  representa una variable binaria la cual toma el valor de “1” si el elemento existe en la configuraci\u00f3n bajo an\u00e1lisis y un valor de “0” si el elemento no est\u00e1 presente en dicha configuraci\u00f3n.

De igual forma en las ecuaciones (2), (3) y (4), la primera sumatoria de cada uno de los dos componentes est\u00e1 asociada con la localizaci\u00f3n del elemento en el sistema (topolog\u00eda) mientras que la segunda sumatoria est\u00e1 asociada con la capacidad del mismo. Para ejemplificar, se explica el primer t\u00e9rmino dando por hecho que los otros dos tienen una forma muy similar: el primer t\u00e9rmino de la ecuaci\u00f3n (2) corresponde al costo de instalaci\u00f3n de nuevos alimentadores, mientras que el segundo t\u00e9rmino corresponde al costo de repotenciar alimentadores existentes; en ambos t\u00e9rminos, la primera sumatoria hace referencia a la ubicaci\u00f3n de dichos alimentadores en el sistema y la segunda sumatoria corresponde a la capacidad de cada uno de esos alimentadores.

Finalmente, la ecuaci\u00f3n (5) muestra los costos variables, correspondientes a las p\u00e9rdidas de energ\u00eda de la red. Las tres sumatorias hacen referencia al n\u00famero de

niveles de carga de la demanda, el total de líneas existentes y el número de periodos de planeamiento, respectivamente.

$$C_t^4 = \beta^{nT} \sum_1^{n^\circ \text{ niveles de carga}} \sum_1^{n^\circ \text{ líneas}} \sum_1^{n^\circ \text{ periodos de planeamiento}} 3 \cdot AP_t \cdot LD_l \cdot nT \cdot R_{ij} \cdot \left[ \left| \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right|^2 \cdot (\sigma_{N-A} + \sigma_{R-A}) \right] \quad (5)$$

En donde:

$AP_t$ : Precio promedio anual de la energía en la etapa t (\$/MW-h)

$LD_l$ : Número total de horas al año del nivel de carga l

$R_{ij}$ : Resistencia asociada al alimentador i-j

$V_i$ : Tensión del nodo i

$V_j$ : Tensión del nodo j

$Z_{ij}$ : Impedancia asociada al alimentador i-j

$\sigma_{N-A}, \sigma_{R-A}$ : Variables binarias asociadas a la existencia de un alimentador (nuevo o repotenciado)

## 2.2. Restricciones.

El problema de planeamiento tiene diferentes restricciones técnicas y operativas. Para modelos de planeamiento, se suele discretizar la capacidad de los elementos, de manera que cada capacidad representa un tipo diferente de elemento. Las restricciones del problema vienen dadas por el balance de potencia nodal en todos los nodos de la red, la capacidad máxima de corriente de los alimentadores, la máxima capacidad de las subestaciones y los generadores distribuidos instalados en la red (mostradas en las ecuaciones (6), (7), (8) y (9) respectivamente). La ecuación (10) representa la restricción asociada a los límites de voltaje en los nodos. La ecuación (11) garantiza que sólo un tipo de subestación pueda localizarse en cada nodo y la ecuación (12), garantiza que solo



un tipo de generador sea instalado en cada nodo. Adicionalmente, la ecuación (13) garantiza que solamente un conductor sea instalado en cada sección de la red. Finalmente, se debe incluir una restricción que garantice la radialidad de la red de distribución; dicha restricción es representada por la ecuación (14).

$$S_{Gi} - S_{Di} = S_{Ni} = \sum_{j=1}^n S_{ij}, \forall_i \quad (6)$$

$$\left| \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right| \leq I_{Conductor.ij}^{\max}, \forall_{ij} \quad (7)$$

$$S_{S_i} \leq S_{S_i}^{\max}, \forall_{S_i} \quad (8)$$

$$S_{G_i} \leq S_{G_i}^{\max}, \forall_{G_i} \quad (9)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \forall_i \quad (10)$$

$$\sum (\sigma_{N-SE_i} + \sigma_{R-SE_i}) \leq 1, \forall_{SE_i} \quad (11)$$

$$\sum (\sigma_{N-GD_i} + \sigma_{R-GD_i}) \leq 1, \forall_{GD_i} \quad (12)$$

$$\sum (\sigma_{N-A_i} + \sigma_{R-A_i}) \leq 1, \forall_{A_i} \quad (13)$$

$$\# \text{Líneas} + 1 \leq \# \text{Nodos} \quad (14)$$

En donde:

$S_{Gi}$  : Potencia aparente generada en el nodo i

$S_{Di}$  : Potencia aparente demandada en el nodo i

$S_{Ni}$  : Potencia aparente neta en el nodo i

$S_{ij}$  : Potencia aparente que fluye por el alimentador ij

$I_{Conductor,ij}^{max}$  : Corriente máxima que soporta el conductor ij

$S_{s_i}$  : Potencia aparente que inyecta la subestación  $S_i$

$S_{s_i}^{max}$  : Potencia aparente máxima que puede inyectar la subestación  $S_i$

$S_{G_i}$  : Potencia aparente que inyecta el generador  $G_i$

$S_{G_i}^{max}$  : Potencia aparente máxima que puede inyectar el generador  $G_i$

$V_i^{min}$  : Tensión mínima permitida en el nodo i

$V_i^{max}$  : Tensión máxima permitida en el nodo i

$\sigma_{N-SE_i}, \sigma_{R-SE_i}$  : Variables binarias asociadas a la existencia de una subestación (nueva o repotenciada)

$\sigma_{N-GD_i}, \sigma_{R-GD_i}$  : Variables binarias asociadas a la existencia de un generador distribuido (nuevo o repotenciado)

### *2.3. Modelo matemático.*

El modelo matemático para el problema de planeamiento de sistemas de distribución con generación distribuida se muestra a continuación:

$$\min \quad OF = \sum_{t=1}^{nS} \beta^{(t-1)nT} \left( C_t^1 + C_t^2 + C_t^3 + C_t^4 \right) \quad (15)$$

*s.a.*

$$S_{Gi} - S_{Di} = S_{Ni} = \sum_{j=1}^n S_{ij}$$

$$\left| \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right| \leq I_{Conductor.ij}^{\max}$$

$$S_{s_i} \leq S_{s_i}^{\max}$$

$$S_{G_i} \leq S_{G_i}^{\max}$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$$

$$\sum \left( \sigma_{N-SE_i} + \sigma_{R-SE_i} \right) \leq 1$$

$$\sum \left( \sigma_{N-GD_i} + \sigma_{R-GD_i} \right) \leq 1$$

$$\sum \left( \sigma_{N-A_i} + \sigma_{R-A_i} \right) \leq 1$$

$$\# \text{Líneas} + 1 \leq \# \text{Nodos}$$

## 3. Búsqueda Tabú (Tabu Search-TS).

---

Un problema de optimización consiste en minimizar o maximizar una función objetivo, sujeto a un conjunto de restricciones. Dependiendo de la naturaleza de la función objetivo, las restricciones y las variables de decisión del problema se puede tornar más sencilla o más compleja la técnica de solución empleada para el mismo. Búsqueda tabú (Tabu Search-TS) es una técnica metaheurística que permite dar solución a problemas de programación no lineal enteros-mixtos, con tiempos de cómputo razonables y con valores de buena calidad para la función objetivo. Esta estrategia metaheurística está basada en conceptos de la inteligencia artificial y la memoria adaptativa, y se basa en la premisa de que se obtiene más información de un movimiento determinístico realizado a una región poco promisorio del espacio de soluciones, que de un movimiento aleatorio realizado a una región de buena calidad. TS implementa diferentes estrategias tales como el uso de las memorias de largo y corto plazo, estrategias de intensificación, diversificación, oscilación estratégica y encadenamiento de trayectorias, entre otras. A continuación se dará una introducción a las técnicas metaheurísticas para después pasar a analizar de manera más detallada el proceso de TS.

### *3.1. Introducción a las técnicas heurísticas y metaheurísticas.*

#### **3.1.1. Generalidades de los problemas de optimización matemática.**

“Se puede decir que un problema de optimización matemática consiste en encontrar un punto que minimice o maximice el valor de una función  $f(x)$ , conocida como función objetivo, con la condición de que  $x$  esté dentro de un conjunto  $A$ , definido por medio de igualdades y desigualdades matemáticas” [5]. De manera general y según la nomenclatura descrita anteriormente, se puede representar un problema de optimización matemática como sigue:

$$\begin{cases} \text{minimizar } f(x) \\ \text{sujeto a} \\ x \in A \end{cases} \quad (16)$$

Según la forma que tomen la función objetivo y las restricciones de igualdad y/o desigualdad, el problema de optimización puede ser clasificado como lineal o no lineal. Además de eso, según la naturaleza de las variables de decisión, el problema se puede clasificar como continuo, entero o mixto. Así, se pueden tener problemas lineales-continuos, lineales-enteros, no lineales-continuos, no lineales-enteros, lineales-enteros mixtos y no lineales-enteros mixtos, siendo éstos últimos los que presentan mayor complejidad matemática para su solución.

Los problemas combinatoriales mixtos o con variables de decisión mixtas son aquellos donde algunas variables asumen valores enteros y otras, valores reales. Dichos problemas presentan el fenómeno de explosión combinatorial, que significa que cuando crece el número de variables de decisión del problema, el número de soluciones así como el esfuerzo computacional (tiempo de cálculo y cantidad de memoria requerida en el proceso) para resolverlo, crece de forma exponencial.

Al enfrentarnos a un problema práctico o de la vida real, aparecen diferentes tipos de complejidad que puede estar relacionada con distintos aspectos. La complejidad se puede encontrar en el modelamiento del problema, la metodología de solución del mismo o en la implementación del modelo en un sistema de cómputo. Sin embargo no todos los problemas combinatoriales son tan complejos de resolver. De hecho, los problemas combinatoriales se pueden dividir en dos grupos: problemas de tipo P, para los que existen algoritmos con esfuerzo computacional de tipo polinomial para encontrar su solución óptima y los tipo NP, para los cuales no se conocen algoritmos con esfuerzo computacional polinomial en su solución [6].

### 3.1.2. Algoritmos heurísticos.

Debido a la gran complejidad matemática que presentan algunos problemas prácticos, aparecen técnicas como las heurísticas o metaheurísticas, para tratar de dar solución a los problemas de optimización de tipo combinatorial con tiempos de cómputo razonables. Cabe aclarar que aunque dichos algoritmos no garantizan la obtención del óptimo global del problema, si encuentran óptimos locales de buena calidad con esfuerzos computacionales relativamente pequeños.

Un algoritmo heurístico es por lo tanto, “una estrategia de búsqueda de soluciones que utiliza un conjunto de procedimientos simples muchas veces basados en el sentido común, que encuentran soluciones de buena calidad de manera simple y rápida. Las técnicas heurísticas, avanzan en cada paso del proceso, hacia la mejor solución vecina y cuando no encuentran un mejor vecino, finalizan el proceso de búsqueda” [6]. Lo anterior establece la principal diferencia entre las técnicas heurísticas y metaheurísticas, debido a que las heurísticas por su naturaleza, conducen el algoritmo a regiones absorbentes donde quedan atrapadas, y no poseen mecanismos que les permitan escapar de éstas, mientras que las metaheurísticas tienen definidas estrategias claras para escapar de las mismas.

Los algoritmos heurísticos pueden clasificarse en: algoritmos constructivos, algoritmos de descomposición y división, algoritmos de reducción, algoritmos de manipulación del modelo y algoritmos de búsqueda a través de vecindad. Se hace énfasis en los algoritmos constructivos y los de búsqueda por vecindad, pues serán los utilizados para resolver el problema de planeamiento.

- **Algoritmos constructivos:** Consisten en ir adicionando, generalmente uno a uno, componentes individuales de la solución hasta encontrar una configuración factible. Se puede decir que paso a paso seleccionan la propuesta que produce mayor beneficio en dicho paso.
- **Algoritmos de búsqueda por vecindad:** “Éstos inician el proceso a partir de una configuración inicial factible o infactible y, usando un mecanismo de transición adecuado, pasan a una solución “vecina” de la solución actual. Generalmente se realiza hasta cumplir una condición de parada. Siempre se almacena además la mejor solución encontrada hasta el momento (incumbente), que será la respuesta una vez terminado el proceso. Todo vecino es obtenido a partir de una configuración  $x$  usando una operación elemental, las cuales entran a definir el tamaño de la vecindad” [6].

### 3.1.3. Técnicas metaheurísticas.

Las técnicas metaheurísticas de optimización parten de los algoritmos heurísticos como los explicados anteriormente, pero se diferencian de los mismos en aspectos fundamentales como los siguientes: la codificación puede ser más eficiente y más genérica considerando soluciones factibles e infactibles, los indicadores de desempeño son más complejos y pueden ser adaptativos, la estructura de vecindad puede variar en forma y tamaño, generalmente se trabajan con un conjunto de soluciones, entre otras. Las principales técnicas metaheurísticas usadas para la solución de problemas en la actualidad son búsqueda tabú (TS), algoritmos genéticos, recocido simulado, colonia de hormigas y enjambre de partículas, teniendo cada una rendimientos diferentes según el tipo de problema a solucionar. Cabe resaltar que no es posible saber de antemano cual técnica resultará mejor para un problema específico, por lo que se hace necesario comparar el rendimiento de distintas técnicas de solución frente a un mismo problema. En éste trabajo, se pretende comparar el rendimiento del algoritmo de TS implementado frente al algoritmo genético planteado en [4] para el problema de planeamiento de sistemas de distribución con generación distribuida.

## 3.2. Generalidades de Tabu Search.

### 3.2.1. Introducción a la búsqueda tabú.

“Búsqueda tabú es una técnica metaheurística fundamentada en conceptos de la inteligencia artificial y la memoria adaptativa, la cual basada en una técnica heurística de búsqueda local, explora configuraciones alrededor de una vecindad con el propósito de evitar que el proceso quede atrapado en un óptimo local”[6]. Esta técnica explora a través de todo el espacio de soluciones basándose en movimientos determinísticos, diferenciándose en esto de otros tipos de metaheurísticas como *algoritmos genéticos* o *recocido simulado*, los cuales se basan algunas veces en movimientos probabilísticos.

“Para evitar que el proceso vuelva a regiones anteriormente exploradas y se presente el fenómeno de ciclaje, TS clasifica los movimientos anteriores como “movimientos tabú” y prohíbe que ese movimiento o alguno de sus atributos puedan volver a ser efectuados durante un número  $n$  de iteraciones posteriores. La técnica se diferencia principalmente de una técnica heurística en dos aspectos” [6]:

- a) Cuando se encuentra en la configuración actual, se permite el paso a la mejor configuración vecina o a la que produzca menos degradación en la función objetivo. Esto quiere decir que se permite que empeore la función objetivo, por lo que se evita quedar atrapado en óptimos locales.
- b) El conjunto de vecinos (vecindad) no es estático. Así, la técnica produce una estructura de vecindad, la cual varía dinámicamente tanto en estructura como en tamaño a lo largo del proceso, permitiendo así una búsqueda eficiente e inteligente.

### **3.2.2. Configuración inicial.**

Se puede partir con una única o con varias configuraciones iniciales y existen diferentes maneras de llegar a una configuración inicial para el algoritmo a implementar. Dicha configuración puede ser obtenida de forma aleatoria o como es común en problemas relacionados con sistemas eléctricos de potencia, utilizando un algoritmo heurístico. Una buena configuración inicial proporciona un mejor rendimiento del algoritmo y reduce el esfuerzo computacional mientras que una mala configuración inicial puede llevar a un mayor esfuerzo de cómputo; con éste fin, se debe procurar que la configuración inicial esté en una región de buena calidad en el espacio de soluciones

### **3.2.3. Codificación y vecindad.**

“La codificación se define como una forma consistente de representar una propuesta de solución de un problema en el espacio de soluciones de dicho problema” [6]. Se debe resaltar que cuando el modelo matemático del problema es muy complejo, prácticamente no existe relación entre las variables de decisión y la estructura de una codificación eficiente.

En la búsqueda local, dada una configuración  $x$ , se define la vecindad de  $x$  como  $N(x)$ , que corresponde al conjunto de todas las configuraciones  $x' \in N(x)$ , donde  $x'$  es un vecino de  $x$ , y que pueden ser obtenidas por la aplicación de un mecanismo de transición a partir de  $x$ . A partir de la configuración actual, se debe pasar a la configuración vecina que presente la mayor disminución (para un problema de minimización) en la función objetivo. Un procedimiento repetitivo de ésta estrategia permite que el algoritmo finalice cuando no existe ninguna configuración vecina



que produzca una disminución en la función objetivo, lo que indica la presencia de un óptimo global. El mecanismo de transición de TS se muestra en la figura1.

#### **3.2.4. Listas tabú y criterios de aspiración.**

TS posee una o varias estructuras que tienen la misma codificación de la configuración actual  $x$ , para almacenar la información de los atributos que han cambiado o no durante el proceso de búsqueda. Basado en la información que proporciona dicha estructura, se pueden tomar decisiones en el futuro. Estas listas tabú pueden ser explícitas o por atributos: explícitas donde se guarda toda la configuración y por atributos cuando solo se tienen en cuenta algunas características de una configuración, presentando facilidad de almacenamiento, verificación y manipulación.

Finalmente, está el criterio de aspiración, cuya finalidad es proporcionar una mayor flexibilidad al proceso. “En éste caso, una configuración que posee atributos prohibidos puede tener la prohibición anulada si esa configuración satisface un criterio de aspiración. Con lo anterior se intenta relajar la rigidez de las listas tabú que almacenan los atributos prohibidos” [6].

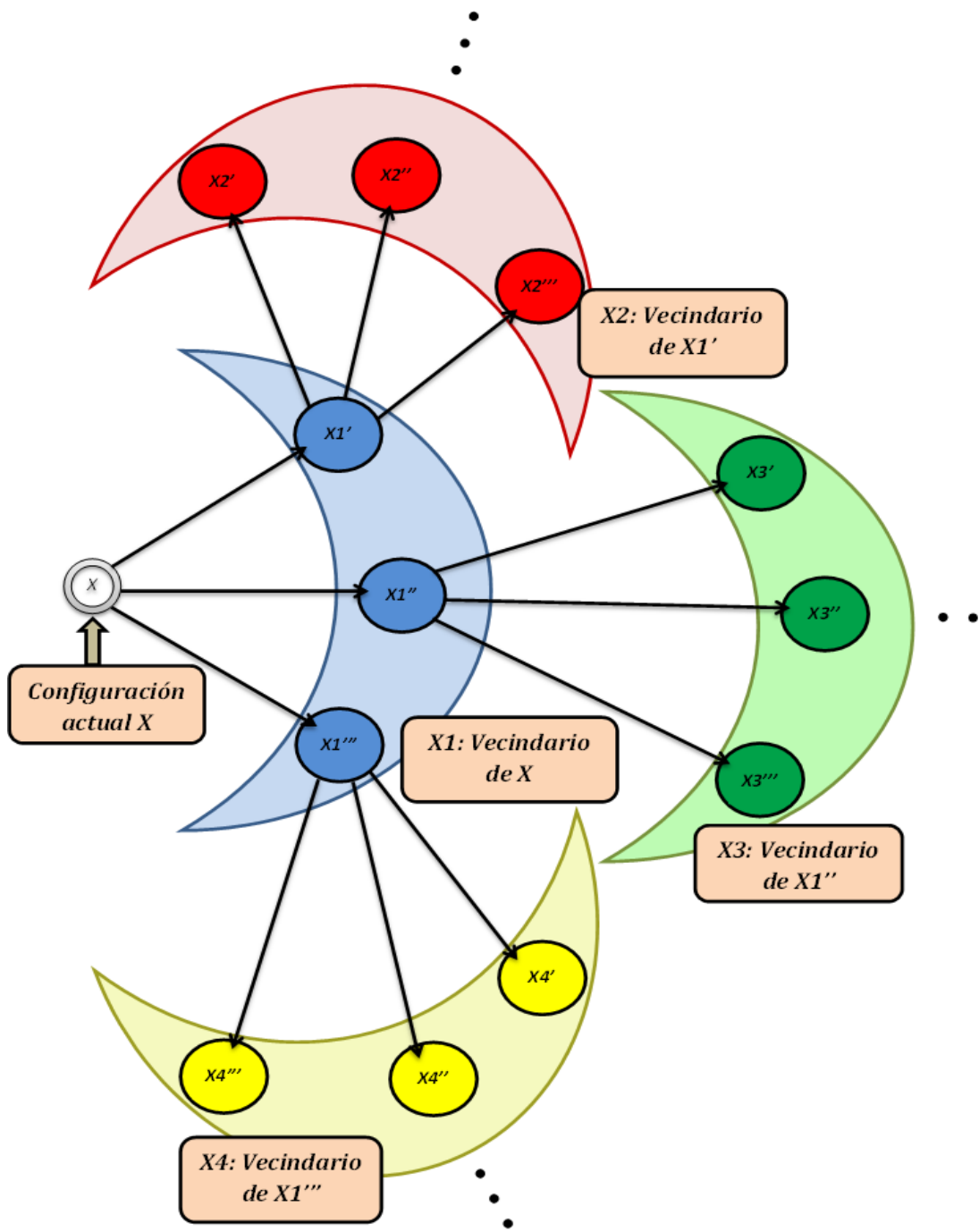


Figura 1: Mecanismo de transición en TS

### *3.3. Memorias y Estrategias de Tabu Search.*

#### **3.3.1. Memorias de corto y largo plazo.**

Un algoritmo de TS completo utiliza todas o una combinación de técnicas de exploración y de memoria avanzadas integradas de las formas más variadas. Algunas de ellas son: memoria de corto y largo plazo, estrategias de intensificación, diversificación, oscilación estratégica, encadenamiento de trayectorias y lista de configuraciones de élite, entre otras.

- **Memoria de corto plazo:** En la memoria de corto plazo, los elementos de la configuración que han cambiado recientemente son clasificados como prohibidos (tabú activos) o en estado tabú durante un número determinado de iteraciones. Este número es almacenado en la memoria de corto plazo y es conocido como “duración tabú”. Varias posiciones o atributos de la configuración pueden estar prohibidas y la “duración tabú” puede o no ser variable a lo largo del proceso. Esta una característica que previene que la técnica no se quede atrapada en ciclos haciendo que el proceso de búsqueda sea inteligente. “La idea básica de la memoria basada en hechos recientes es evitar volver a configuraciones ya visitadas y a aquellas configuraciones que comparten los atributos tabú-activos; ésta última parte puede representar un problema porque se pueden eliminar configuraciones muy atractivas del vecindario. El criterio de aspiración entra a resolver parcialmente ésta limitante” [3], [6].
- **Memoria de largo plazo:** La incorporación de una estrategia de largo plazo entrega al algoritmo TS una sofisticación adicional para que el desempeño sea más eficiente. Lo que quiere decir que además de la memoria de corto plazo, se incorpora una estrategia adicional, la memoria de largo plazo. Algunas estrategias relacionadas con la memoria de largo plazo son: memoria basada en frecuencia, estrategia de intensificación y estrategia de diversificación.

- **Memoria basada en frecuencia:** Consiste en almacenar la información del número de veces que un atributo en una configuración fue escogido para generar o participar en la formación de nuevas configuraciones.” La información de la memoria basada en frecuencia puede ser utilizada para aplicar estrategias de intensificación o diversificación basándose en la frecuencia de permanencia de un atributo, penalizando o incentivando configuraciones con determinados atributos” [6], [3]. Existen dos tipos de memoria basada en frecuencia:
  - **Frecuencia de transición:** que guarda el número de veces que un atributo fue retirado o adicionado para formar nuevas configuraciones.
  - **Frecuencia de residencia o permanencia:** que guarda el número de veces que un atributo permanece en las nuevas configuraciones.
  
- **Estrategia de intensificación:** “La estrategia de intensificación se basa en la modificación de las reglas de elección para favorecer movimientos en la búsqueda de nuevas configuraciones, utilizando la información acumulada en el proceso de búsqueda” [7]. En otras palabras, lo que se hace es cambiar la forma como se construye el conjunto reducido de candidatos  $N^*(X)$ , nuevo vecindario de  $x$ . Con esto se puede regresar a regiones atractivas para realizar una búsqueda más intensa.

La intensificación tiene como objetivo reducir el número de alternativas a ser evaluadas para concentrarse en regiones determinadas. Puede ser implementada de formas diferentes:

- Eliminando o incorporando nuevos vecinos en la configuración actual, comúnmente considerando configuraciones de élite o configuraciones que tengan esos atributos como vecinos.
- Modificando la caracterización de la configuración vecina, lo que se obtiene al redefinir el vecindario  $N(X)$ .
- Retornando a regiones atractivas para hacer una búsqueda más intensa en la vecindad.

- Realizando intensificación por descomposición, donde se agregan restricciones sobre atributos, estructuras o partes del problema para disminuir el espacio de búsqueda.
- **Estrategia de diversificación:** La estrategia de diversificación consigue llevar la búsqueda a nuevas regiones. Se basa en la idea de que la modificación de las reglas de selección tiene como consecuencia la selección de atributos que no fueron utilizados frecuentemente. Se cambia la forma como se construye el conjunto de vecindad  $N(X)$ , incorporando vecinos constituidos por atributos que fueron poco usados. De este modo, al agregar estos nuevos atributos en las configuraciones, la búsqueda se traslada a nuevas regiones probablemente no visitadas [3]. Por buscar configuraciones en el espacio de soluciones poco visitadas, los resultados pueden llevar mejoras significantes.

### 3.3.2. Oscilación estratégica.

“La oscilación estratégica es un excelente mecanismo para realizar una interacción entre diversificación e intensificación a mediano o largo plazo. Esta técnica opera cuando se ha logrado un nivel crítico, en el que un algoritmo de TS normalmente se detendría. Así, antes de parar después de lograr un nivel crítico, se pueden cambiar las reglas de selección de nuevas configuraciones candidatas para pasar a una región fuera del límite del nivel crítico. Una vez pasado el nivel crítico, se cambian nuevamente la regla de selección de configuraciones candidatas tanto en el alejamiento como en el retorno al nivel crítico, por lo que se produce un movimiento oscilatorio alrededor del nivel crítico” [6].

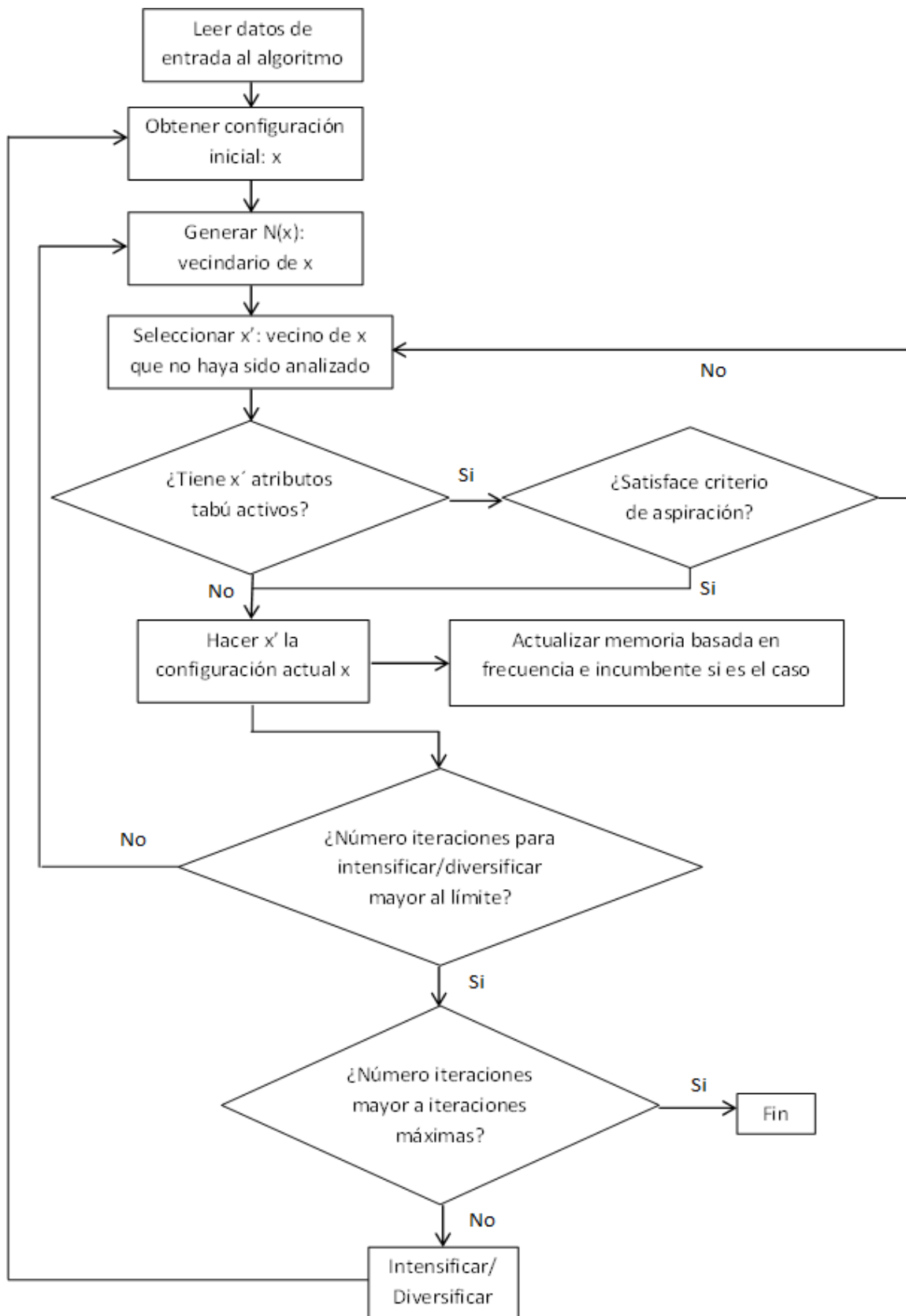
El uso de ésta técnica presenta varias ventajas: primero, permite la ejecución de movimientos que son menos complejos que otros que podrían ser ejecutados. Segundo, el movimiento fuera de la vecindad permite el retorno por diferentes direcciones descubriendo oportunidades para mejorar la función objetivo que no son fácilmente alcanzables cuando la búsqueda es más limitada. Otra ventaja es que permite descubrir buenas soluciones para condiciones de perturbación, donde las restricciones pueden ser ligeramente ajustadas [8].

### **3.3.3. Encadenamiento de trayectorias.**

Esta estrategia permite encontrar nuevas configuraciones usando trayectorias que “interconectan” configuraciones elite. “En ella se selecciona una configuración elite denominada configuración base y otra u otras denominadas configuraciones guía. Así, se pueden obtener nuevas configuraciones a partir de la configuración base incorporando atributos presentes en las configuraciones guía. Las configuraciones así obtenidas pueden ser usadas para intensificación o diversificación dependiendo de la cantidad de atributos incorporados en la configuración base. La idea de ésta estrategia es obtener configuraciones construidas por atributos de alta calidad, pertenecientes a configuraciones de alta calidad” [6].

Desde una orientación espacial, “el proceso de generar combinaciones lineales de un conjunto de solución de referencia puede ser caracterizado como generar trayectorias entre y más allá de las soluciones, donde las soluciones de cada trayectoria también sirven como fuentes para generar trayectorias adicionales” [9].

Un diagrama de bloques de algoritmo de búsqueda tabú básico se muestra en la figura 2.



**Figura 2: Diagrama de bloques Tabu Search**

## 4. Tabu Search Aplicado al Planeamiento de la Distribución con Generación Distribuida.

---

### 4.1. Generalidades.

Como se mencionó anteriormente, el modelo de optimización es un modelo de programación no lineal entero-mixto. En éste trabajo y como suele hacerse usualmente con éste tipo de problemas, dicho modelo se solucionará utilizando técnicas metaheurísticas. Aquí se utilizó una metodología de maestro/esclavo como estrategia de solución en la cual el maestro, representado a través de un algoritmo de búsqueda tabú e implementado en Matlab®, propone una solución al problema, la cual posteriormente es evaluada por el esclavo, implementado en Gams®. En términos del problema, el maestro propone la topología para la red de distribución de energía eléctrica, indicando además los diferentes tipos correspondientes a las capacidades de cada elemento tales como subestaciones (SE's), generadores distribuidos (GD's) o alimentadores. El maestro debe tener en cuenta además todas las restricciones del problema de planeamiento tales como regulación de tensión en los nodos, límites de corriente por las líneas, balances de potencia, entre otras; la configuración generada por el mismo debe cumplir con todas las restricciones detalladas en las ecuaciones 6 a 14. En términos matemáticos el maestro fija todas las variables enteras del problema de optimización tales como número y ubicación de los elementos, así como su respectiva capacidad. Luego, teniendo la propuesta del maestro, el esclavo puede entrar a calcular la función objetivo indicada por la ecuación 1. La estrategia de maestro/esclavo será exitosa siempre y cuando el maestro sea capaz de proponer diferentes topologías que alcancen los valores más bajos de la función objetivo a través del proceso iterativo [4]. Por su nivel de complejidad, se explica primero el esclavo y posteriormente se pasa a detallar el maestro. La estrategia maestro/esclavo se muestra en un diagrama de bloques junto con el resto de la estrategia que propone el algoritmo en la figura 3.



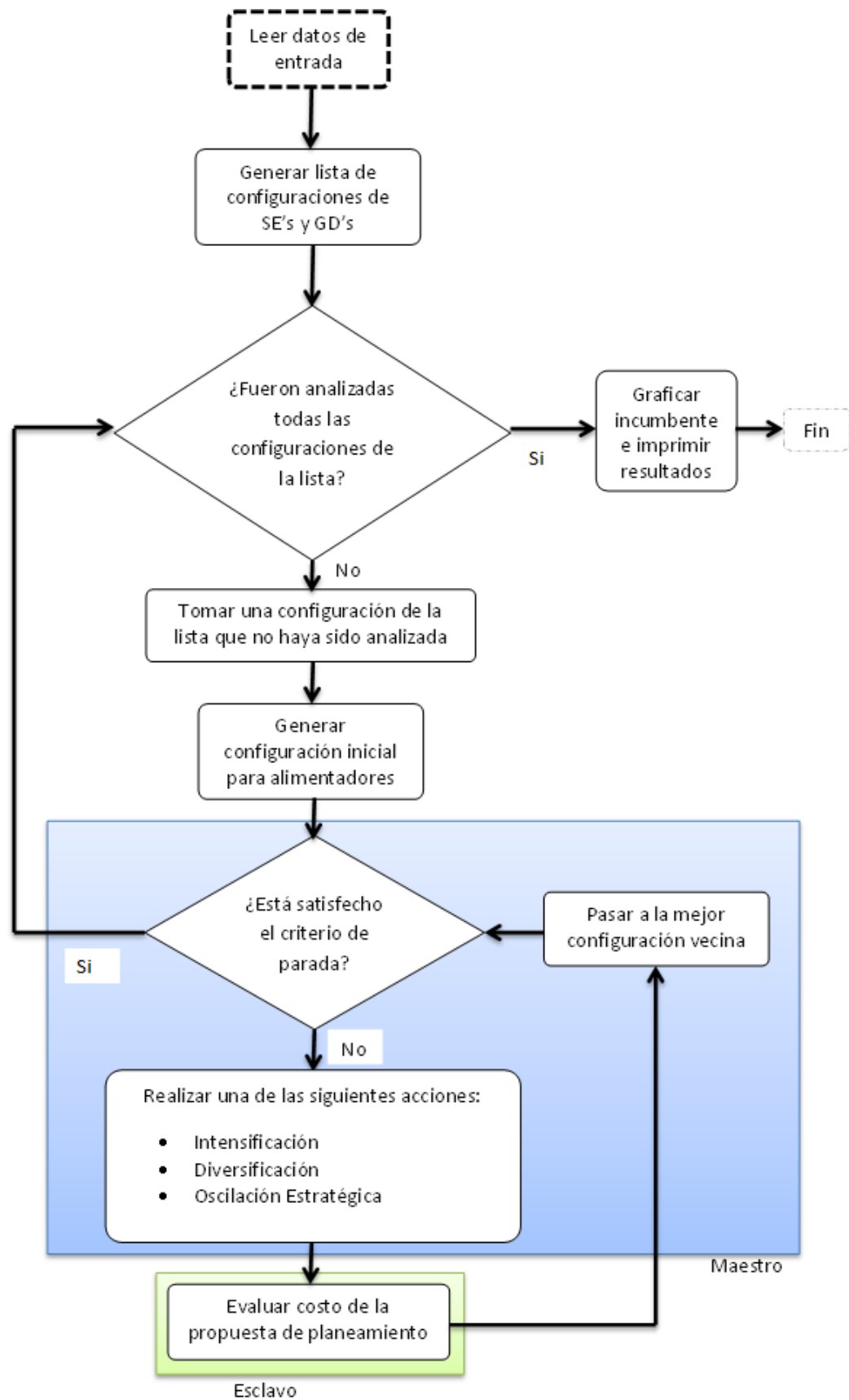


Figura 3: Diagrama de bloques del algoritmo

## 4.2. Algoritmo Esclavo.

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo esclavo evalúa la propuesta del maestro y calcula el valor de la función objetivo para una topología dada. Se debe notar que los tres primeros términos de la función objetivo mostrada en la ecuación 1 vienen dados en función de la topología propuesta para el sistema, mientras que el cuarto término representa los costos operativos de la red eléctrica. Dicho término puede ser calculado solucionando un flujo óptimo de potencia que se deriva de la formulación matemática presentada en el capítulo 2. El flujo de potencia óptimo, tomado de la referencia [4] e implementado en Gams, busca minimizar las pérdidas de potencia activa de la red eléctrica sujeto a las restricciones operacionales del sistema.

Para una topología dada por el maestro, el flujo de potencia óptimo encuentra cual es la potencia que debe entregar cada subestación y cada generador distribuido activos en la configuración bajo análisis, con el fin de que las pérdidas y por tanto los costos operativos del sistema sean los más bajos posibles. El flujo entrega además los valores para las tensiones nodales, las potencias activas y reactivas que entrega cada subestación y cada generador distribuido, las pérdidas del sistema y los valores de potencias activa y reactiva ficticias, éstas últimas activadas solamente en caso de que la generación no sea capaz de suplir la demanda o en caso de que la restricción de límites de capacidad de corriente sea violada; en cualquiera de los dos casos mencionados, las potencias ficticias se activan representando el valor que hace falta a la generación para poder proporcionar la convergencia del flujo de potencia. Se debe aclarar además que el algoritmo entrega los resultados antes mencionados para cada nivel de carga analizado en el planeamiento. El modelo matemático para el flujo óptimo de potencia (tomado de la referencia [4]), se muestra a continuación:

$$\min P_{Loss} = \sum_{\forall i} \sum_{l=1}^{nL} \sum_{t=1}^{nS} \text{real} \{ S_{S_i} + S_{G_i} \} \quad (17)$$

s. a .

$$S_{Gi} - S_{Di} = S_{Ni} = \sum_{j=1}^n S_{ij}$$

$$\left| \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right| \leq I_{Conductor.ij}^{\max}$$

$$S_{s_i} \leq S_{s_i}^{\max} \quad (18)$$

$$S_{G_i} \leq S_{G_i}^{\max}$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$$

### 4.3. Algoritmo Maestro.

Se puede notar en la figura 3 que previo a empezar las acciones del algoritmo maestro, el que a su vez comanda las acciones del esclavo, se realizan una serie de procedimientos los cuales son necesarios para el correcto funcionamiento del algoritmo. Primero se leen las variables de entrada al problema tales como tipos y capacidades de alimentadores, subestaciones (SEs) y generadores distribuidos (GDs), las demandas de potencia nodales, las bases del sistema eléctrico, los costos de cada uno de los elementos, entre otros. Segundo, se procede a realizar un algoritmo de búsqueda tabú el cual va a proporcionar una lista de configuraciones de generación (SEs y GDs) de buena calidad para ser analizadas posteriormente. Tercero, se genera una configuración inicial para los alimentadores del sistema en cada configuración de generación seleccionada previamente, mediante el uso de un algoritmo heurístico constructivo. Una vez implementados los tres pasos descritos anteriormente se puede dar inicio al algoritmo maestro que proporcionará mediante un proceso iterativo la solución a la propuesta de planeamiento. Los algoritmos implementados en los pasos dos y tres se describen a continuación.

#### 4.3.1. Lista de configuraciones élite para generación (SEs y GDs)

La obtención de ésta lista de configuraciones élite para SEs y GDs se hace con el fin de simplificar el espacio de solución del problema y reducir el esfuerzo computacional que empleará el maestro encontrando la solución al problema de planeamiento. Esta metodología se adopta debido a que existen muchas posibles combinaciones para SEs y GDs que no son capaces de satisfacer la demanda total del sistema y además, muchas combinaciones que están sobredimensionadas con respecto a la demanda total, satisfaciendo la misma pero presentando sobrecostos en la función objetivo que resultan innecesarios en aras de minimizar los costos totales de la propuesta de planeamiento.

La configuración inicial para dicho algoritmo puede ser aleatoria o bien puede ser obtenida a partir de un algoritmo heurístico constructivo, basado en la premisa de que se debe satisfacer la demanda de potencia activa del sistema y las pérdidas del mismo, con el menor costo de inversión. El algoritmo emplea una metodología clásica de búsqueda tabú, esto es: después de tener una configuración inicial se obtiene una lista de configuraciones vecinas ordenadas de acuerdo a los costos de inversión que represente cada propuesta; posteriormente el algoritmo debe pasar a la mejor configuración vecina que no tenga un “tabú activo”. Siempre que después de un determinado número de iteraciones definido previamente el algoritmo no encuentre mejoras en la función objetivo, se debe aplicar un proceso de diversificación, el cual viene dado por una topología diferente para iniciar con el proceso de búsqueda. La codificación empleada para el algoritmo se muestra a continuación:

SE1	SE2	SE3	GD1	GD2	GD3
[1	1	0	2	0	3]

El número correspondiente a cada elemento representa el tipo del mismo, que viene directamente asociado a su capacidad de inyectar potencia a la red. Un número mayor representa un GD o una SE de mayor capacidad; de igual forma, un cero representa que ese elemento no está presente en la configuración bajo análisis. En el ejemplo podemos observar que se encuentran activas las dos primeras SEs con un tipo 1, así como los GDs 1 y 3 con tipos 2 y 3, respectivamente. La SE 3 así como el GD 2 no están presentes en la propuesta de generación que se muestra. Los tipos para los dos elementos van a variar desde 1

hasta el número de tipos diferentes disponibles para los mismos. Se tienen dos criterios para generar el vecindario: incrementando en 1 el tipo de un único elemento de los 6 disponibles en la configuración o reduciendo en 1 el tipo de un elemento de la configuración. Esta propuesta de vecindario se toma de la referencia [10], y se modifica según los requerimientos del problema bajo análisis. El incremento y la reducción de un tipo para alguno de los elementos se realiza siempre y cuando se esté dentro de los límites dados por el número de tipos disponibles; en el ejemplo y teniendo un número máximo de tipos de GDs igual a 3, la sexta posición de la configuración no puede ser incrementada puesto que el tipo máximo disponible para GDs es 3. De igual forma, las posiciones 3 y 5 correspondientes a la SE3 y el GD2 no pueden ser reducidos en un tipo, puesto que el mínimo tipo permitido es el cero, representando la ausencia del elemento. El vecindario para la configuración mostrada anteriormente, se muestra a continuación haciendo énfasis en la posición que da origen a la configuración vecina:

Reducir Una Posición	{	Vecino 1:	[	0	1		0	2	0	3]
		Vecino 2:	[	1	0		0	2	0	3]
		Vecino 3:	[	1	1		0	1	0	3]
		Vecino 4:	[	1	1		0	2	0	2]
Incrementar Una Posición	{	Vecino 5:	[	2	1		0	2	0	3]
		Vecino 6:	[	1	2		0	2	0	3]
		Vecino 7:	[	1	1		1	2	0	3]
		Vecino 8:	[	1	1		0	3	0	3]
		Vecino 9:	[	1	1		0	2	1	3]

Siempre que se seleccione un vecino como se describió anteriormente, la posición que se incrementó o se redujo en un tipo queda con un “tabú activo”, por lo que un vecino que afecte la posición mencionada no podrá ser elegido en las iteraciones siguientes mientras el atributo tabú permanezca activo. La única manera para que un vecino que presenta tabú activo sea admitido es que éste pueda satisfacer el criterio de aspiración, el cual en este caso corresponde a presentar una mejora en la incumbente (mejor solución encontrada hasta el momento). Adicional a esto, todos los vecinos que no sean capaces sobrepasar la demanda del sistema (más un incremento asociado a las pérdidas) son descartados del proceso de selección. Dicha estrategia se repite hasta que se cumpla un criterio de parada dado por máximo número de iteraciones; al terminar el proceso se tendrán varias

configuraciones para la generación que son capaces de suplir el balance de potencia y que poseen bajos costos. Al finalizar con el algoritmo, se obtienen todas las permutaciones de posiciones posibles para cada configuración elite encontrada en el proceso, obteniendo así configuraciones con igual función objetivo e igual capacidad de generación, pero diferentes en cuanto a la ubicación de los elementos en el sistema; lo anterior debido a que la ubicación de los elementos tiene incidencia directa en la función objetivo.

Para dar por terminada la ejecución del algoritmo global, el maestro debe analizar todas y cada una de las configuraciones propuestas para SEs y GDs con sus respectivas permutaciones.

#### **4.3.2. Algoritmo heurístico constructivo para obtener la configuración inicial de alimentadores.**

Luego de tener una configuración específica a analizar para SEs y GDs, se genera una configuración inicial para los alimentadores, bajo la premisa de energizar todos los nodos del sistema (así estos no tengan una demanda asociada), manteniendo la radialidad propia de las redes de distribución. Es importante tener todos los nodos correctamente conectados y garantizar la radialidad de la configuración inicial, puesto que bajo ese mismo criterio se generará posteriormente el vecindario para el algoritmo de búsqueda tabú que comanda el maestro.

El algoritmo constructivo empieza energizando todos los nodos que estén seguidos de una SE a partir de la línea que sale del nodo hacia la misma, esto bajo la premisa de que se tendrá una mejor regulación de tensión así como un nivel de pérdidas más bajo. Posteriormente y después de haber energizado todos los nodos consecutivos a una SE, se energizan los nodos faltantes colocando siempre la línea de menor longitud y de menor calibre que pueda energizar dichos nodos, puesto que a menor longitud menores serán los costos de inversión en las mismas. Durante todo el proceso se verifica que no se unan dos SEs entre sí, o dos nodos previamente energizados, pues esto implicaría perder la radialidad del sistema. Los pasos del algoritmo se muestran a continuación:

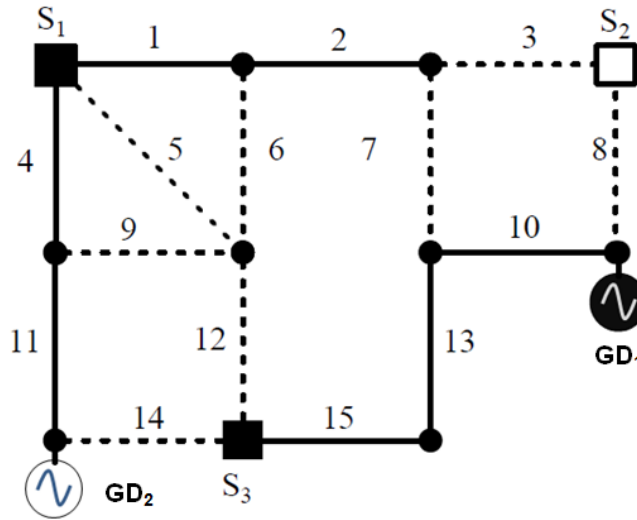
- 1) Elegir un nodo para ser energizado.
- 2) Si existe un alimentador que salga de una SE activa hacia el nodo analizado, conectar dicho nodo a través de ese alimentador.

- 3) En caso de que no exista un alimentador que conecte directamente el nodo con una SE, ir al paso 1 y colocar el nodo en una lista de nodos pendientes por energizar. Si todos los nodos ya fueron analizados ir al paso 4.
- 4) Seleccionar un nodo de la lista de nodos pendientes por energizar.
- 5) Conectar el nodo bajo análisis a través de la línea de menor longitud que llegue a un nodo energizado y eliminar dicho nodo de la lista de nodos pendientes. Si no hay ninguna línea que conecte el nodo con uno ya energizado, ir al paso 6.
- 6) Dejar el nodo en lista de nodos pendientes e ir al paso 4. Si la lista de nodos pendientes está vacía, terminar el proceso.

### **4.3.3. Maestro.**

Después de obtener una configuración específica para la generación y la configuración inicial para las líneas mediante la heurística constructiva, se inicia el proceso iterativo del maestro. La codificación implementada para este problema se basa en la referencia [11] y se adapta para el caso específico. Dicha codificación se muestra en la figura 4, y se explica a continuación: en el vector de codificación se organizan primero las líneas, segundo las SEs y tercero los GDs, sin importar que los elementos estén activos o no en la iteración de análisis. El número correspondiente a cada posición determina el tipo del elemento dentro del grupo de capacidades disponibles; es decir el 2 debajo de la línea 1 representa un alimentador del tipo 2, y así sucesivamente para todos los elementos. Un número más grande siempre representa una mayor capacidad para el elemento así como un cero representa que el elemento no está activo en esa configuración, es decir las líneas 3, 5, 6, 7, 8,9,12, 14 así como la SE 2 y el GD 2 no se encuentran presentes en la configuración que se muestra en la figura 4.

El número de tipos para una posición va desde cero (representando la ausencia del elemento en la configuración) hasta el número máximo de tipos disponibles para cada elemento. La codificación se hace de manera análoga a la que se hizo para los GDs y SEs, teniendo incluida la codificación de generación hallada anteriormente y la codificación para los alimentadores. El algoritmo maestro sólo realizará cambios en la parte del vector correspondiente a los alimentadores, estando la configuración para generación fija hasta que se tome otra configuración de la lista de configuraciones élite de generación previamente definida.



**Figura 4: Codificación para alimentadores  
(Tomado de referencia [11])**

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	SE1	SE2	SE3	GD1	GD2
2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	2	0	1	1	0

La propuesta de vecindario para una configuración específica de alimentadores se toma de la referencia [12]. El proceso “consiste en sustituir una línea que está conectada al sistema en la topología actual, por una línea que hace parte de un conjunto de líneas que pueden ser construidas, manteniendo la topología radial del sistema“. El proceso se divide en tres pasos:

- 1) Escoger una línea para ser eliminada de la configuración actual.
- 2) Los vecinos resultarán de adicionar todos los posibles alimentadores que permitan energizar el nodo o tramo de red que quedó desconectado después de realizar el paso 1.
- 3) Realizar los pasos 1) y 2) para todas las líneas existentes en la configuración actual. El vecindario será la unión de los vecindarios resultantes para cada línea.

Una vez definido el vecindario para una configuración específica, se pasa a seleccionar el vecino, el cual pasará a ser la configuración actual en la siguiente iteración. Los vecinos se organizan de menor a mayor de acuerdo a su función objetivo, y se debe seleccionar el vecino que posea una mejor función objetivo y



que no posea un atributo tabú activo. Para evitar tomar en cuenta vecinos que presenten algún grado de infactibilidad, siempre que dichas infactibilidades se presenten, se penaliza la función objetivo de dicha configuración, agregando un incremento a los costos totales de la propuesta de planeamiento. Otras restricciones como la de radialidad, número máximo de conductores por tramo de red y número máximo de SEs o GDs por nodo, se encuentran inmersas en la codificación de la propuesta de planeamiento.

Con el fin de reducir el esfuerzo computacional que emplea el algoritmo, el tipo más adecuado para los alimentadores se obtiene a partir de un índice de sensibilidad para cada conductor. El tipo más adecuado se selecciona de acuerdo a dos tipos de costos: los costos fijos que sólo dependen del calibre del conductor y la longitud del mismo, y los costos variables que dependen de la potencia que transporta la línea. Por lo anterior, se corre un flujo de potencia para saber cuál es la corriente por un alimentador específico y se selecciona el calibre con corriente nominal inmediatamente superior a la que circula por el alimentador.

El atributo tabú utilizado para el proceso fue prohibir que una línea que acaba de ingresar, pueda ser retirada de la topología durante el número de iteraciones que dure el tabú. La duración del tabú debe ser ajustada según el tamaño del sistema de prueba. El número de iteraciones que un atributo permanece prohibido debe ir reduciéndose a medida que avanzan las iteraciones y de igual forma, cada línea que vaya siendo adicionada en una iteración adquiere el atributo tabú activo. La única manera de que un vecino que posee un tabú activo pueda ser tenido en cuenta en la iteración bajo análisis, es que dicho vecino satisfaga el criterio de aspiración, que en nuestro caso corresponde a lograr mejorar la función objetivo de la incumbente (mejor configuración factible encontrada hasta el momento), caso en el cual el vecino pasaría a ser la nueva configuración incumbente del proceso.

La estrategia de diversificación se da en el proceso al cambiar la configuración de generación, pues se genera un cambio “drástico” en los costos totales de la propuesta de planeamiento. El cambio generado en la función objetivo al sustituir unas líneas por otras no representa un gran cambio en los costos totales de la propuesta.

La lista de configuraciones elite del proceso reúne las mejores topologías encontradas durante el proceso iterativo y tiene un tamaño especificado previamente. Siempre que se encuentre una configuración con mejor función

objetivo que la última configuración de la lista de configuraciones élite, la configuración que se encuentra ubicada en la última posición, será reemplazada por la que mejora la función objetivo. El criterio de parada para el algoritmo que intercambia alimentadores viene dado por máximo número de iteraciones sin modificar la incumbente del proceso. Después de esto, se pasa a diversificar tomando una nueva topología para la generación y volviendo a repetir el proceso.

#### **4.3.4. Post-optimización.**

El proceso de post-optimización se realiza para todas las configuraciones que se encuentran dentro de la lista de configuraciones élites resultantes después de finalizar el proceso iterativo. El proceso se divide en dos partes:

Primero, se desconectan todos los alimentadores que poseen un flujo de potencia nulo, debido a que alimentan nodos sin carga y no son absolutamente necesarios para energizar otros nodos con carga. Con lo anterior, se logra reducir la función objetivo debido a que se reducen los costos de inversión en alimentadores. La estrategia se toma de la referencia [3].

Segundo y enfocado a reducir los costos operativos de cada configuración, se modifican los calibres de los conductores que están conectados a las SEs, debido a que son los que transportan la mayor corriente y por tanto, presentan mayor cantidad de pérdidas de energía. Para cada línea que parte de una SE activa, se busca mediante la ejecución de varios flujos de potencia, ajustar el calibre más adecuado para el conductor bajo análisis, buscando siempre una mejora en la función objetivo.

El calibre solo será modificado si el incremento en los costos de inversión o repotenciación de alimentadores sumado a la reducción que se produce en los costos operativos al aumentar el calibre, genera una disminución en la función objetivo inicial para la configuración bajo análisis.

## 5. Resultados numéricos.

---

### 5.1. Sistema de prueba I - 12 nodos.

#### 5.1.1. Descripción del sistema.

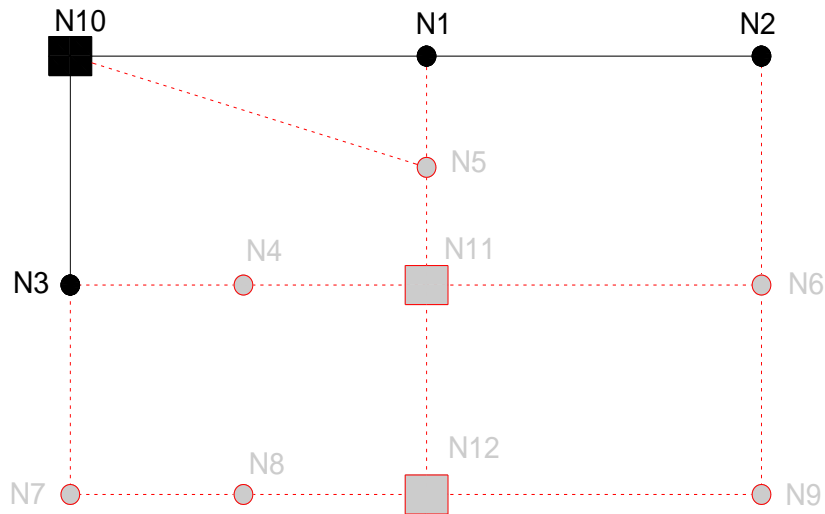
El sistema de prueba se muestra en la figura 5. Éste cuenta con cuatro diferentes tipos de líneas correspondientes a distintos calibres, así como dos tipos diferentes de subestaciones (SEs) que se asocian a distintas capacidades. Además, se tienen cinco tipos de generadores distribuidos (GDs) con diferentes capacidades cada uno. El sistema está compuesto por un conjunto de 12 nodos, 16 líneas de las cuales 3 son líneas existentes del tipo 1 y 13 son líneas propuestas, una SE existente de tipo 1 en el nodo 10, dos SEs propuestas en los nodos 11 y 12, además de cuatro GDs propuestos los cuales se ubican en los nodos 2, 6, 8 y 9. Los datos correspondientes a demandas eléctricas, valores técnicos del sistema, parámetros y costos de líneas, tipos y costos de SEs y GDs se muestran en el anexo 1.

Las SEs poseen costos ligados a la inversión en nuevas unidades y costos asociados a repotenciar las unidades existentes. Los GDs únicamente poseen costos asociados a la inversión en nuevas unidades, puesto que se considera que inicialmente la red de distribución a planificar no posee penetración de generación distribuida. Tanto para GDs como para SEs se asume un factor de potencia constante típico en sistemas de distribución de 0.85 en atraso, pues en ambos casos los diferentes tipos de unidades vienen dados por su capacidad de potencia activa. A cada nodo del sistema se asocia una demanda de potencia activa y reactiva, teniendo sin demandas de potencia los nodos en donde se encuentran ubicadas las subestaciones.

En cuanto a las líneas, se tienen costos asociados a la repotenciación de alimentadores existentes y costos de inversión para nuevos alimentadores. En ambos casos, los costos vienen dados por unidad de longitud. Además, para cada tipo de línea se especifica su capacidad máxima de corriente, su resistencia y su reactancia inductiva por unidad de longitud.

La red de distribución tiene un nivel de tensión de 13.2 KV y se tiene asociado un costo de la energía de 250 \$/kW-h. Los límites de tensión permitidos se

consideran de 0.95 y 1.05 en por unidad (pu). El modelo de planeamiento es a una sola etapa, en un periodo de 3 años. El factor de descuento  $\beta$  utilizado para traer los costos de pérdidas a valor presente es 0.9961.

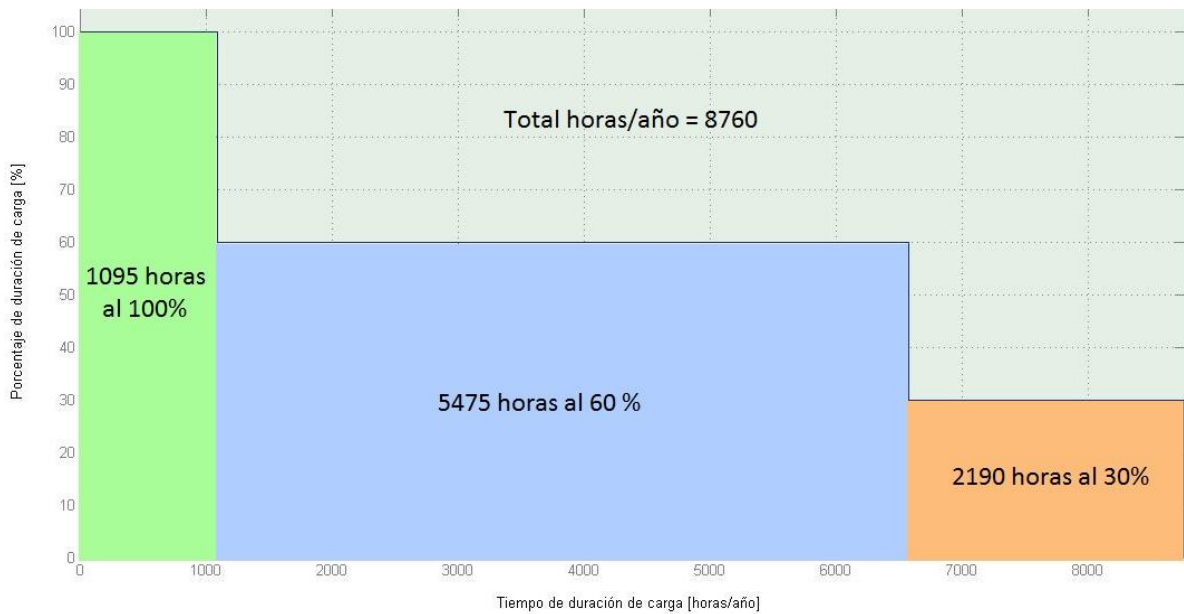


**Figura 5 - Sistema de prueba 12 nodos**

Como es común, mientras se planea las redes de distribución de energía, se realizará una discretización de la curva de duración de carga. Los distintos niveles de carga utilizados se toman como porcentajes de la demanda máxima con una duración de horas por año específica. Los datos correspondientes a la curva de duración de carga se relacionan en la tabla 1. Además de eso, la curva se muestra en la figura 6:

<i>Niveles de carga</i>		
<i>Porcentaje de carga (%)</i>	<i>Duración de carga (horas/año)</i>	<i>Porcentaje de duración de carga (%)</i>
100	1095	12.5
60	5475	62.5
30	2190	25

**Tabla 1– Niveles de carga**



**Figura 6– Discretización curva de duración de carga**

### 5.1.2. Resultados.

Después de aplicar la técnica de optimización planteada al sistema bajo análisis, se obtuvieron diferentes topologías con valores de función objetivo de buena calidad, aprovechando la lista de configuraciones élites que proporciona búsqueda tabú (BT). Los parámetros de entrada al algoritmo de BT implementado se presentan en la tabla 2:

<b>Duración tabú líneas</b>	4
<b>Número de configuraciones élite</b>	10
<b>Iteraciones para diversificar líneas</b>	15
<b>Iteraciones máximas líneas</b>	20
<b>Duración tabú generadores</b>	3
<b>Iteraciones máximas generadores</b>	50
<b>Número de configuraciones de generación a analizar</b>	130

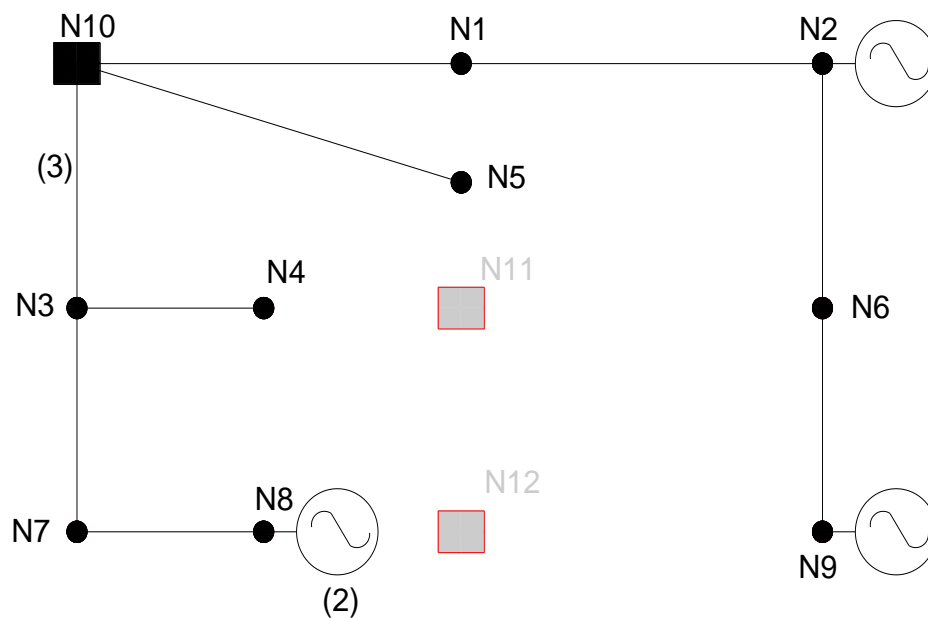
**Tabla 2 – Parámetros del algoritmo de búsqueda**

**Tabú para el sistema de 12 nodos**

Se debe tener presente que el algoritmo se divide en dos partes: la primera (parámetros de la tabla 2 en azul) que busca configuraciones económicas de buena calidad para las topologías de generadores y subestaciones; la segunda (parámetros de la tabla 2 en verde), que realiza la búsqueda de las configuraciones más adecuadas para los alimentadores para cada configuración de generadores-subestaciones encontrada en la primera parte.

El parámetro de *duración tabú líneas* hace referencia al número de iteraciones que permanece prohibido cierto atributo de una configuración de alimentadores después de que ingresa o sale de la misma. El *número de configuraciones élite* determina la dimensión de la lista de mejores configuraciones encontradas por el algoritmo, en la cual la número uno (incumbente) será al final de la ejecución del programa, la solución al problema de planeamiento. El parámetro *iteraciones para diversificar líneas* hace referencia al número máximo de iteraciones sin mejorar la función objetivo que tienen lugar antes de efectuar el proceso de diversificación, el cual viene dado por una topología diferente para subestaciones y generadores distribuidos. El parámetro *iteraciones máximas líneas* representa el número de iteraciones que se dan a lo sumo antes de que el algoritmo aplique el mecanismo de diversificación. Por otra parte, los tres últimos parámetros de la tabla 2 corresponden a parámetros del algoritmo que entrega las configuraciones de generación para ser evaluadas: *iteraciones máximas generadores* corresponde al número máximo de iteraciones que tienen lugar en el algoritmo antes de que se aplique el mecanismo de diversificación para topologías de generación y *duración tabú generadores* hace alusión al número de iteraciones que permanece prohibido un atributo de una configuración de generación desde el momento en el que cambia, hasta cuándo puede volver a ser utilizado.

A continuación se presentan los resultados de la metodología aplicada al sistema de prueba. La topología con el costo total más bajo encontrada por el algoritmo se muestra en la figura 7, mientras que los costos relacionados a la misma se muestran en la tabla 3. El tiempo de ejecución del programa fue de 14329.48 segundos (3.98 horas), con un procesador de 1.8 GHz y 2 GB de memoria RAM.



**Figura 7 – Solución al problema de planeamiento sistema de prueba 12 nodos**

<b>Costos totales de la propuesta de planeamiento sistema de prueba 1 (Miles de millones de pesos)</b>	
Costo de alimentadores (nuevos o repotenciados)	0.148
Costo de subestaciones (nuevas o repotenciadas)	0
Costo de generadores distribuidos	1.1
Costos operativos (pérdidas)	1.846
<b>Costos totales</b>	<b>3.094</b>

**Tabla 3 – Relación de costos propuesta de planeamiento sistema de prueba 1**

### 5.1.3. Análisis de resultados.

En la figura 7 se observa la solución del problema de planeamiento. La topología encontrada es de tipo radial y las tensiones nodales permanecen dentro de los límites permitidos, al igual que las corrientes que circulan por las líneas, la potencia circulante por las mismas y las capacidades máximas de generadores y subestaciones. La configuración posee una única subestación instalada del tipo 1 en el nodo 10; se tienen nueve líneas para alimentar las demandas de potencia, de las cuales ocho son del tipo 1 y tan sólo una es del tipo 3 (línea que une los nodos 10-3). Existen además generadores distribuidos del tipo 1 ubicados en los nodos 2 y 8, y un generador del tipo 2 en el nodo 9. Aunque dentro de la ejecución del algoritmo no se descartan para ser tenidos en cuenta como posibles nodos de paso que permitieran energizar otros nodos, los nodos 11 y 12 se encuentran aislados porque no poseen una demanda de potencia activa ni reactiva asociada a ellos.

Las subestaciones propuestas ubicadas en los nodos 11 y 12 no hacen parte de la solución al problema de planeamiento, debido a que es posible alimentar la demanda con la subestación existente en el nodo 10 y algunos generadores distribuidos. La subestación existente se conserva en su tipo inicial, por lo que no representa costos ni de repotenciación ni de inversión en la función objetivo. Aunque es posible alimentar la demanda con dicha subestación y tres generadores distribuidos del tipo 1, en la solución aparece un generador del tipo 2; lo anterior se debe a que al incrementar la capacidad de generación en los GDs, las pérdidas de potencia activa en el sistema y los costos operativos asociados a las mismas disminuyen. En éste caso la disminución en los costos operativos es mayor que el costo que representa repotenciar una de las unidades generadoras, razón por la que se presenta la topología mostrada.

Por último, se puede observar que las líneas presentes en la solución son en su mayoría las de menor longitud que pueden energizar los nodos; éste comportamiento era de esperarse, pues los costos en las líneas son directamente proporcionales a su longitud. El sistema no posee una segunda etapa de planeamiento, por lo que la topología mostrada es la propuesta final al final del horizonte de planeamiento.



## 5.2. Sistema de prueba II – 54 nodos.

### 5.2.1. Descripción del sistema.

El sistema de prueba II se toma de la referencia [4] y se muestra en la figura 8. Dicho sistema cuenta con cuatro tipos de alimentadores diferentes que corresponden a calibres distintos, al igual que tres tipos diferentes de subestaciones (SEs), tres tipos de generadores distribuidos (GDs) en la primera etapa y cuatro tipos diferentes de GDs en la segunda etapa. En su primera etapa, el sistema está compuesto por un conjunto de 23 nodos, 31 líneas de las cuales 11 son existentes y 20 son propuestas, dos SEs existentes del tipo 1 en los nodos 22 y 23, no posee subestaciones propuestas y tiene además dos GDs propuestos en los nodos 6 y 18. En su segunda etapa, el sistema tiene 54 nodos, 72 líneas, dos SEs existentes en los nodos 22 y 23, dos SEs propuestas en los nodos 53 y 54 además de tres GDs propuestos. El número de líneas, SEs y GDs existentes así como sus capacidades y ubicación dentro del sistema para la segunda etapa, dependerán de los resultados arrojados por el algoritmo para la primera etapa del planeamiento. Los valores correspondientes a demandas nodales, valores técnicos, parámetros, tipos y costos para elementos como líneas, SEs y GDs se muestran en el anexo 2.

Las subestaciones tienen costos asociados a la repotenciación de elementos existentes y a la inversión en nuevos elementos. En la primera etapa, los GDs sólo poseen costos de inversión puesto que se parte del hecho de que no existe penetración de generación distribuida al inicio de los periodos de planeamiento; sin embargo, a diferencia del sistema de prueba de 12 nodos, para la segunda etapa los GDs pueden ser repotenciados teniendo así dos componentes en los costos de los mismos, asociados a inversión y repotenciación. Al igual que en el sistema de prueba I, se asume para las SEs y GDs un factor de potencia constante típico para sistemas de distribución de 0.85 en atraso. Se cuenta con la información correspondiente a las demandas de potencia en cada etapa; las demandas varían de una etapa a la otra y en nodos donde la carga era cero en la primera etapa, puede presentarse carga en la siguiente etapa. Cada nodo viene caracterizado por su demanda de potencia activa y reactiva, existiendo sin embargo nodos que no poseen carga (20, 22 y 23 para la primera etapa y además de dichos nodos, exceptuando el nodo 20 que adquiere carga, se agregan 34, 48, 51, 53 y 54 para la segunda etapa). En cuanto a las líneas, donde los costos asociados vienen dados por unidad de longitud de los elementos, se tienen costos

asociados a la repotenciación de alimentadores existentes y de inversión en nuevos alimentadores.

La red de distribución a planificar posee un nivel de tensión de 28 KV con un costo de la energía de 250 \$/kW-h. Los límites de tensión se acotan entre 0.95 pu y 1.05 pu. Los límites de capacidad de corriente vienen dados por el límite térmico de las líneas, asociado a cada tipo de alimentador. El modelo de planeamiento es multietapa y posee dos etapas en periodos de 5 años cada una, con el fin de reducir el error en la predicción de la demanda. El factor de descuento  $\beta$  así como la curva de duración de carga, corresponden a los mismos que fueron utilizados para el sistema de prueba I y que se detallaron en la sección 5.1.1. Se debe resaltar que para la segunda etapa se debe llevar a valor presente, además de los costos operativos, los costos de inversión de todos los elementos, pues por ser un planeamiento multietapa las inversiones para la segunda etapa se deben hacer en el futuro, una vez finalice la primera etapa.

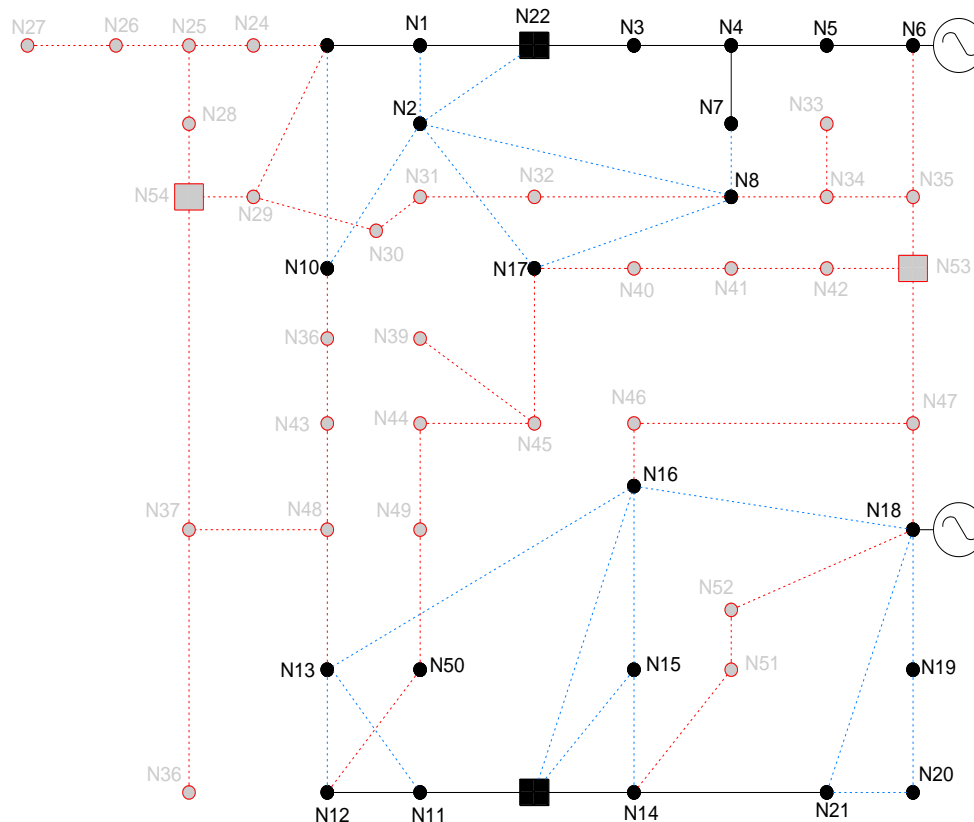


Figura 8 – Sistema de prueba de 54 nodos

## 5.2.2. Resultados

- **Etapa 1**

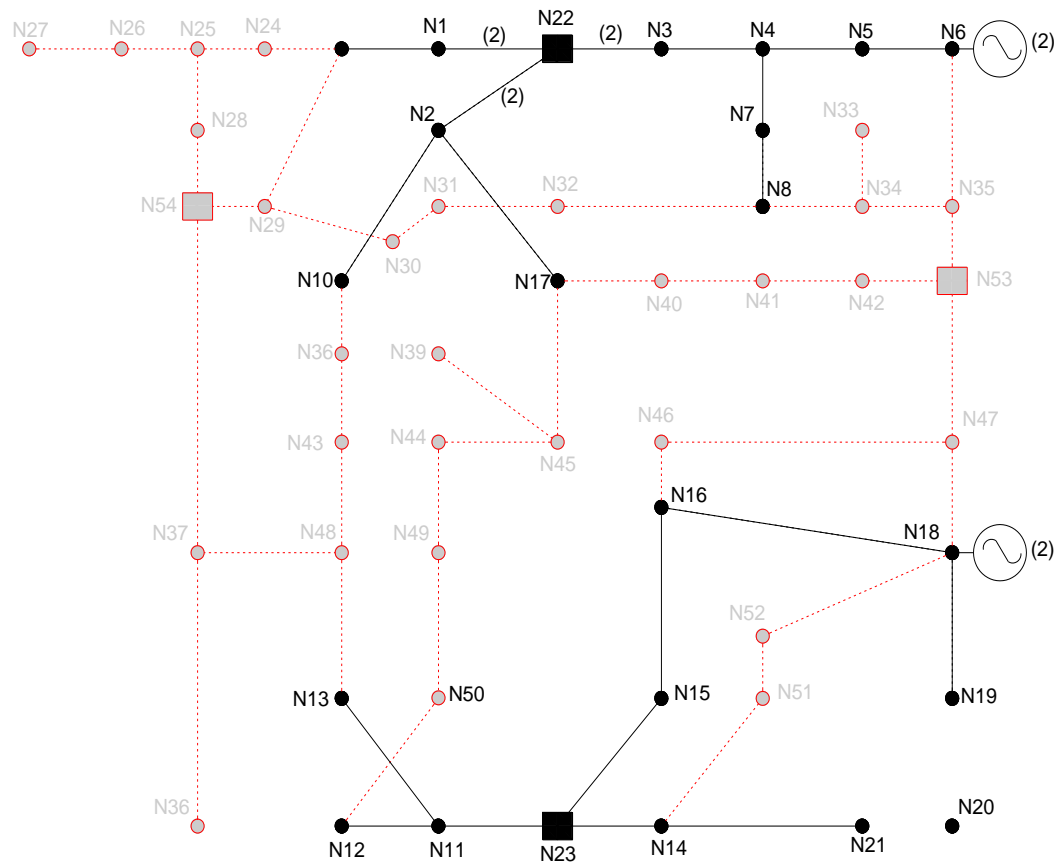
Los parámetros de entrada al algoritmo para el planeamiento de la primera etapa se presentan en la tabla 4. Dicha etapa tiene un periodo de duración de 5 años y corresponde a un sistema de 23 nodos. Se obtuvieron diferentes configuraciones de buena calidad para la solución al problema de planeamiento de sistemas de distribución con generación distribuida.

<b>Duración tabú líneas</b>	6
<b>Número de configuraciones élite</b>	10
<b>Iteraciones para diversificar líneas</b>	15
<b>Iteraciones máximas líneas</b>	20
<b>Duración tabú generadores</b>	1
<b>Iteraciones máximas generadores</b>	20
<b>Número de configuraciones de generación a analizar</b>	50

**Tabla 4 – Parámetros del algoritmo de búsqueda tabú para el sistema de 54 nodos, primera etapa**

Los parámetros de entrada al algoritmo tienen la misma interpretación que en la sección 5.1.2, cuando se mostraron los resultados para el sistema de prueba de 12 nodos; sin embargo, los valores son diferentes debido a las diferencias presentadas entre los dos sistemas tales como tamaño de la red, número de subestaciones que se pueden adicionar, número de alimentadores propuestos, cantidad de generadores distribuidos propuestos, entre otros.

A continuación se presentan los resultados de la mejor configuración encontrada para el sistema de 54 nodos en su primera etapa de planeamiento. La topología solución al problema de planeamiento se presenta en la figura 9 mientras que los costos asociados a la misma se muestran en la tabla 5. Al igual que en el sistema de prueba de 12 nodos, el algoritmo se implementó en un procesador de 1.8 GHz y 2 GB de memoria RAM. El tiempo de ejecución del programa fue de 4655.2 segundos (1.29 horas).



**Figura 9 – Solución al problema de planeamiento sistema de prueba 54 nodos, etapa 1**

Costos totales de la propuesta de planeamiento sistema de prueba 2, etapa 1 (Miles de millones de pesos)	
Costo de alimentadores (nuevos o repotenciados)	2.8636
Costo de subestaciones (nuevas o repotenciadas)	0
Costo de generadores distribuidos	0.9
Costos operativos (pérdidas)	1.7417
<b>Costos totales</b>	<b>5.5053</b>

**Tabla 5 – Relación de costos propuesta de planeamiento sistema de prueba 2, etapa 1**

- **Etapa 2**

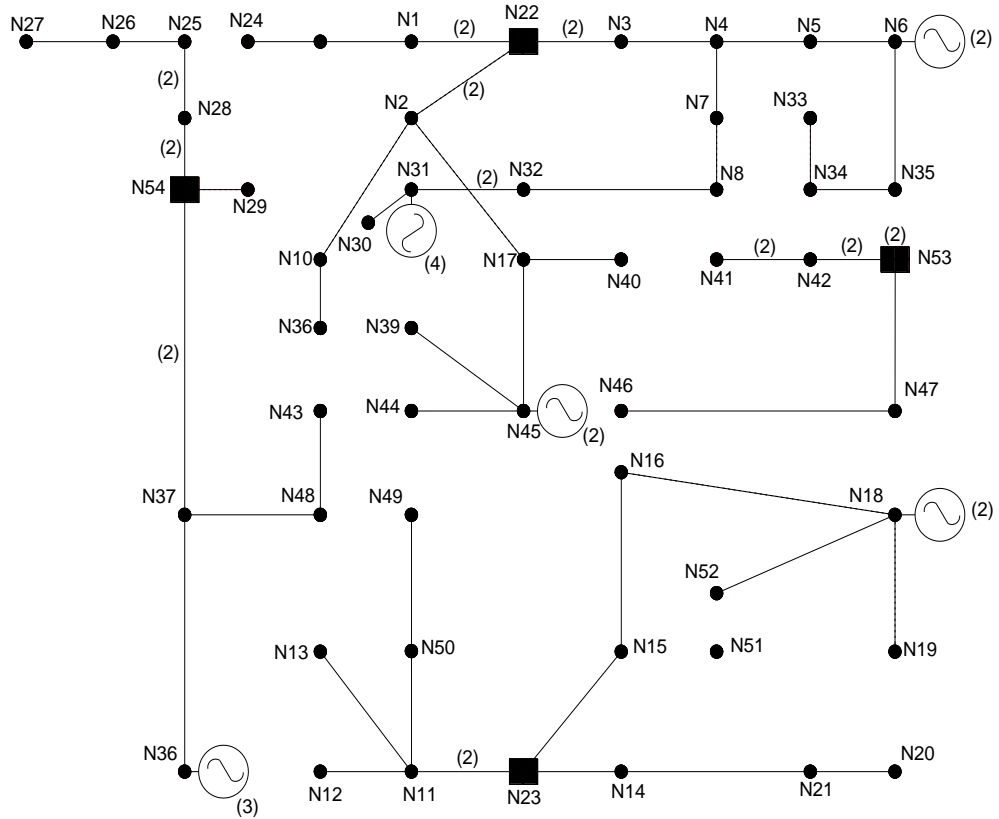
Los parámetros de entrada al algoritmo para el planeamiento de la segunda etapa del sistema de prueba II se presentan en la tabla 6. Dicha etapa tiene un periodo de duración de 5 años y corresponde a un sistema de 54 nodos. Para este caso, por ser parte de una metodología de planeamiento multietapa, se debe partir desde la solución encontrada para el planeamiento en la etapa 1. Así, se asume que la configuración inicial para la segunda etapa del sistema es la topología mostrada en la figura 9.

<b>Duración tabú líneas</b>	6
<b>Número de configuraciones élite</b>	10
<b>Iteraciones para diversificar líneas</b>	15
<b>Iteraciones máximas líneas</b>	20
<b>Duración tabú generadores</b>	1
<b>Iteraciones máximas generadores</b>	20
<b>Número de configuraciones de generación a analizar</b>	50

**Tabla 6 – Parámetros del algoritmo de búsqueda tabú para el sistema de 54 nodos, primera etapa**

Los parámetros de entrada al algoritmo tienen la misma interpretación que tenían para los dos casos anteriores y se detallan en la sección 5.1.2. Los valores son diferentes debido a las diferencias presentadas entre los dos sistemas y las dos etapas de planeamiento, principalmente debidas al tamaño de la red y al número de elementos de la misma.

A continuación se presenta la solución al problema de planeamiento para el sistema de 54 nodos en su segunda etapa. La topología más óptima encontrada que da solución al problema de planeamiento se presenta en la figura 10 mientras que los costos asociados a la misma se muestran en la tabla 7. Se obtuvo un tiempo de ejecución del algoritmo de 167.48 horas (6.978 días) utilizando el mismo procesador de los casos anteriores.



**Figura 10 – Solución al problema de planeamiento sistema de prueba 54 nodos, etapa 2**

<b>Costos totales de la propuesta de planeamiento sistema de prueba 2, etapa 2 (Miles de millones de pesos)</b>	
Costo de alimentadores (nuevos o repotenciados)	7.0089
Costo de subestaciones (nuevas o repotenciadas)	1.0787
Costo de generadores distribuidos	1.8632
Costos operativos (pérdidas)	5.9213
<b>Costos totales</b>	<b>15.8721</b>

**Tabla 7 – Relación de costos propuesta de planeamiento sistema de prueba 2, etapa 2**

### 5.2.3. Análisis de resultados

- **Análisis.**

La solución a la primera y segunda etapas de planeamiento para el sistema de prueba II se muestran en las figuras 9 y 10, respectivamente. Las topologías encontradas por el algoritmo en ambos casos cumplen con las restricciones del problema tales como tener una estructura radial, balances de potencia nodal, tener una única subestación o generador en los nodos y tener un solo alimentador en un tramo específico de la red. Adicionalmente, se respetan los límites de tensión para todos los nodos así como los límites de corriente por los alimentadores. La potencia entregada por subestaciones y generadores distribuidos suple las demandas de potencias activas y reactivas de todos los nodos en cada etapa, así como las pérdidas del sistema. Aunque dentro de la ejecución del algoritmo no se descartan para ser tenidos en cuenta como posibles nodos de paso que permitieran energizar otros nodos o instalar GDs y SEs en ellos, el nodo 51 se encuentra aislado al final del proceso porque no posee una demanda de potencia activa ni reactiva asociada. Los nodos 34 y 48 no poseen demanda de potencia asociada, pero se utilizan como nodos de paso para energizar otros nodos que se encuentran aguas abajo de los mismos en la red de distribución.

Al final de la primera etapa, las subestaciones existentes en los nodos 22 y 23 se conservan del tipo 1; no se tenían subestaciones propuestas para ésta etapa. Se instalan dos generadores distribuidos del tipo 2 en los nodos 6 y 18. Los alimentadores existentes que unen los nodos 22-1 y 22-3, que inicialmente eran de tipo 1, pasan a ser de tipo 2. Se instalan 9 nuevos alimentadores para energizar el sistema, de los cuales 8 son del tipo 1 y tan sólo 1 es del tipo 2 (alimentador 2-22). Para la segunda etapa, las subestaciones existentes en los nodos 22 y 23 se conservan en tipo 1 y adicionalmente, se instalan en los nodos 53 y 54 dos nuevas subestaciones tipo 2 y 1, respectivamente. Se instalan además tres generadores distribuidos tipo 3, 2 y 4 en los nodos 31, 36 y 45, respectivamente; los generadores de los nodos 6 y 18 se conservan en tipo 2. Por otra parte, para alimentar los nuevos nodos, se instalan con respecto a la topología del final de la primera etapa, 23 nuevos alimentadores tipo 1 y 6 del tipo 2. Además, el alimentador 23-11 que al final de la primera etapa era del tipo 1, pasa a ser del tipo 2.

Se debe observar que todos los generadores distribuidos así como las subestaciones propuestas al inicio de la primera etapa, se incorporaron con distintas capacidades al sistema, al final de la segunda etapa. Las cuatro subestaciones instaladas alimentan porciones de red independientes, es decir que no se encuentran conectadas entre sí, debido a que se perdería la condición de radialidad del sistema de distribución; además, se debe notar que no se permiten redes aisladas alimentadas únicamente por generadores distribuidos, debido a que la finalidad de los mismos es ayudar a suplir las demandas de potencia así como las pérdidas del sistema, pero nunca ser el suministro principal de energía de los diferentes circuitos.

Los generadores se encuentran en los nodos terminales de cada red, característica que les permite mejorar los perfiles de tensión en los nodos más alejados de las mismas, así como disminuir las pérdidas de potencia del sistema (disminuir costos operativos). La inclusión de generadores permite eliminar la necesidad de repotenciar algunos alimentadores, así como de incrementar la capacidad de las subestaciones. En cuanto a las líneas, siempre se busca el tipo más adecuado que permita distribuir la potencia sin violar los límites térmicos del conductor así como reducir lo más posible las pérdidas a través del mismo, situaciones con las cuales se verá afectada positivamente la función objetivo (menores costos).

- **Comparación con otros algoritmos.**

Finalmente, se busca realizar una comparación de la técnica de solución implementada en el presente trabajo para resolver el problema de planeamiento de redes de distribución con penetración de generación distribuida, con otros algoritmos implementados anteriormente en la referencia [8] para solucionar el mismo problema. Con dicha intención se realiza la tabla 8, donde se muestran los costos obtenidos para las dos etapas del sistema de prueba II por separado y el costo total de la propuesta de planeamiento, en millones de dólares (MUSD). Se considera una tasa de cambio de 1 USD = 1816.94 pesos, ya que ésta fue la utilizada en dicha referencia.



RELACIÓN DE COSTOS SISTEMA DE PRUEBA II (MUSD)					
Etapa 1		Etapa 2		Total (Etapa 1 + Etapa 2)	
Costo alimentadores	1,5761	Costo alimentadores	3,8575	Costo alimentadores	5,4336
Costo subestaciones	0	Costo subestaciones	0,5937	Costo subestaciones	0,5937
Costo generadores distribuidos	0,4953	Costo generadores distribuidos	1,0255	Costo generadores distribuidos	1,5208
Costos operativos (pérdidas)	0,9586	Costos operativos (pérdidas)	3,2589	Costos operativos (pérdidas)	4,2175
<b>COSTOS ETAPA 1</b>	<b>3,0300</b>	<b>COSTOS ETAPA 2</b>	<b>8,7356</b>	<b>COSTOS TOTALES</b>	<b>11,7656</b>

**Tabla 8 – Relación de costos sistema de prueba 2 (Millones de dólares)**

El paper correspondiente a la referencia [4] implementa tres algoritmos diferentes para solucionar el problema de planeamiento de sistemas de distribución y redes gas natural. Para este fin, evalúa tres casos diferentes: el primero donde se realiza un planeamiento de los dos sistemas sin tener generadores distribuidos; el segundo, donde se incorporan los generadores pero se realiza un planeamiento separado de las dos redes y el tercero, donde los generadores entran a ser las unidades vinculantes de los dos sistemas y se realiza un planeamiento integrado de las mismas. Los casos utilizados para realizar el proceso comparativo son el dos y el tres, puesto que despreciando el planeamiento de la red de gas y considerando que la misma es capaz de suplir la demanda de fluido requerida por las unidades generadoras, presenta la misma estructura del problema analizado en el presente documento.

El tercer algoritmo implementado en la referencia [4], el cual corresponde al de mejor desempeño y el de mayor esfuerzo computacional, es un algoritmo genético de Chu-Beasley. Los costos totales presentados para el planeamiento de la red eléctrica (sin tomar en cuenta los costos de la red de gas) en los casos 2 y 3 utilizando el algoritmo de Chu-Beasley, son de 9.36

y 9.82 MUSD, respectivamente. Adicionalmente, el tiempo de ejecución del algoritmo para el caso 3 y la primera y segunda etapas del problema, fue de 1.9 y 5.9 días, respectivamente. Se observa que el costo total obtenido por el algoritmo de búsqueda tabú implementado en el presente trabajo para el sistema de prueba II (11.7656 MUSD) es superior a los costos obtenidos para los casos 2 y 3 de la referencia [4]. Además, el tiempo de ejecución del algoritmo de búsqueda tabú (1.29 horas y 6.98 días para las etapas 1 y 2 respectivamente) es inferior en la primera etapa pero superior en la segunda en relación el caso 3 de la referencia.

De lo anterior se puede observar que **el algoritmo de búsqueda tabú tiene un mejor desempeño que el algoritmo genético de Chu-Beasley planteado en [4] para sistemas de prueba relativamente pequeños**, debido a que encuentra soluciones óptimas de buena calidad y en tiempos de cómputo mucho menores. Sin embargo, **cuando el tamaño del sistema crece y se acerca más a un sistema real, el desempeño del algoritmo de búsqueda tabú es superado por el del algoritmo genético de Chu-Beasley**, pues utiliza aproximadamente el mismo tiempo de cómputo pero encuentra soluciones con una función objetivo más grande que el algoritmo de Chu-Beasley de la referencia.

Se debe además tener en cuenta que en la programación del algoritmo de la referencia [4] se permite, para la segunda etapa de planeamiento, realizar modificaciones sobre la topología de entrada al algoritmo tales como cambiar la ubicación y dimensionamiento de generadores y alimentadores resultado de la primera etapa, con el fin de optimizar la función global de costos. Dicha estrategia no es considerada en el algoritmo de búsqueda tabú implementado, pues éste asume que se debe partir de la red inicial e ir adicionando nuevos elementos o aumentando la capacidad de elementos existentes para entregar una solución al problema, pero no permite remover o reducir la capacidad de elementos existentes.

De igual forma, se observa que aunque el algoritmo de búsqueda tabú no superó los resultados obtenidos por el algoritmo genético de Chu-Beasley en [4], **es capaz de superar ampliamente los resultados correspondientes a los otros dos algoritmos implementados en la referencia, los cuales corresponden a una metodología clásica de enjambre de partículas y otra de un algoritmo genético clásico.**

## 6. Conclusiones.

---

- Se desarrolló un algoritmo de búsqueda tabú el cual permitiera encontrar soluciones óptimas y de buena calidad para el problema de planeamiento de sistemas de distribución con generación distribuida. El algoritmo tenía como opciones la instalación de nuevos elementos tales como generadores distribuidos, subestaciones o alimentadores así como la repotenciación de elementos de ésta misma naturaleza existentes en la red.
- Se debe investigar sobre la penetración de la generación distribuida en los sistemas de distribución de energía, pues éstos traen consigo ventajas tales como mayor confiabilidad, mejoramiento de perfiles de tensión, reducción en las pérdidas técnicas del sistema, reducción en costos correspondientes a alimentadores o subestaciones, reducción en contaminantes para el medio ambiente, entre otras.
- La GD también trae consigo grandes retos en aspectos tales como la coordinación de protecciones, variaciones sobre la tensión de la red, niveles de corto circuito o el mercado eléctrico, por lo que se hace necesario incluir diferentes aspectos al momento de analizar y planificar la red.
- La inclusión de las unidades de generación distribuida junto con alimentadores y subestaciones en el modelo de planeamiento permite tener una menor inversión en los costos totales del sistema, pues desde el principio se tiene en cuenta el impacto de las unidades de GD en la red, por lo que el proceso iterativo permite ir optimizando el dimensionamiento y ubicación de los mismos.
- Es importante realizar un adecuado planeamiento de las redes de distribución, puesto que de no hacerse así, se pueden presentar diversas situaciones tales como que los elementos queden sobredimensionados, se incumplan las restricciones técnicas u operativas de los sistemas, entre otras.
- La metodología implementada puede ser utilizada para un horizonte de planeamiento mono etapa o uno que sea multietapa. El algoritmo presenta rendimientos diferentes, encontrando soluciones de mejor calidad y en

menor tiempo para sistemas de prueba pequeños; a medida que el tamaño del sistema crece, el costo computacional lo hace de manera exponencial.

- El algoritmo permite además la incorporación de distintos niveles de carga para en análisis, realizando una discretización por periodos de tiempo de la curva de duración de carga. Lo anterior permite un mayor acercamiento con los sistemas reales, pues en los sistemas de distribución la demanda no es constante en un periodo determinado de tiempo.
- El algoritmo heurístico constructivo implementado para la obtención de la configuración inicial del problema resulta muy útil, pues permite que el proceso iterativo de optimización se inicie desde un punto de buena calidad en el espacio de soluciones del problema, permitiendo encontrar mejores soluciones y en tiempos de cómputo más razonables para el sistema.
- Búsqueda tabú es una técnica metaheurística que presenta mejor rendimiento que las metodologías de algoritmos genéticos clásica y enjambre de partículas clásica para el problema de planeamiento de sistemas de distribución implementados en la referencia [4]. Sin embargo, se puede notar que el rendimiento del algoritmo genético de Chu-Beasley implementado en la misma referencia es mejor que el obtenido con búsqueda tabú.
- Como trabajos futuros, se pueden incluir la confiabilidad del sistema o el mejoramiento de perfiles de tensión en el modelo de planeamiento, de tal forma que se plantee un problema multiobjetivo el cual se enfoque en minimizar los costos de inversión y operativos pero mejorando los niveles de confiabilidad y niveles de tensión.
- Igualmente como trabajos futuros, se pueden considerar realizar el planeamiento a través de una metodología que además de minimizar los costos de inversión, procure reducir las emisiones de los niveles de CO<sub>2</sub> emitidos por las unidades generadoras. Además, se puede realizar un planeamiento integrado de sistemas de distribución de energía eléctrica con sistemas de distribución de gas natural como el que se muestra en la referencia [4], implementado a través de búsqueda tabú.

## 7. BIBLIOGRAFIA.

---

- [1] C. Ponce, Planificación óptima de la generación distribuida en redes de distribución de energía eléctrica, Zaragoza, España: Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, 2010.
- [2] G. A. Restrepo, J. C. Angel, Utilización de algoritmos genéticos para la ubicación y diomensionamiento óptimo de centrales de GD y su efecto sobre las pérdidas y perfiles de tensión en redes de distribución, Pereira: Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.
- [3] J. F. Franco, Planeamiento de sistemas de distribución usando búsqueda tabú, Pereira: Tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [4] C. A. Saldarriaga, R. A. Hincapie y H. Salazar, «A Holistic Approach for Panning Natural Gas and Electricity Distribution Network,» Transactions On Power Systems IEEE, vol. 28, nº Issue 4, 2013.
- [5] H. M. Mora, Optimización no lineal y dinámica, Bogotá: UNILIBROS, Universidad Nacional de Colombia, 2001
- [6] R. A. Gallego, A. H. Escobar y E. M. Toro, “Técnicas metaheurísticas de optimización”, Pereira: Taller de publicaciones Universidad Tecnológica de Pereira, Primera edición, 2010.
- [7] Gallego, R., Escobar, A., Romero, R. “Técnicas de optimización combinatorial”, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006
- [8] F. Glover, «Tabu Search, Part I,» ORSA Journal on Computing, vol. 1, nº 3, pp. 190-206, 1989.
- [9] Fundamentals of scatter search and path relinking, Fred Glover-Manuel Laguna, Control and Cybernetics, vol. 29, num. 3, pp. 653-684, 2000.
- [10] Application of Tabu search to optimal placement of DG. K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, T. Ashizaw, Conference: Power Engineering Society Winter Meeting IEEE. Columbus, Ohio.2001, vol. 2 , pp. 918-923

[11] J.F. Franco, Pérez, R.A. Gallego. «Planeamiento de sistemas de distribución usando búsqueda tabú», pp. 85-90. Scienta et Technica, mayo de 2007, UTP, no 34, vol. XIII

[12]B. R. Pereira, A. M. Cossi y J. R. Sanches, Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica a través de um modelo de programação não linear inteiro misto e busca tabu, Ilha Solteira: Faculdade de engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2011.

# Anexo 1 – Datos sistema de prueba I

---

## I. Valores técnicos del sistema.

<b>Vbase [kV]</b>	13,2
<b>Vmax [pu]</b>	1,05
<b>Vmin [pu]</b>	0,95
<b>Sbase [MVA]</b>	10
<b>Periodo de planeamiento [Años]</b>	3
<b>Costo Energía [\$/Kw-h]</b>	250

Tabla 1 – Valores técnicos sistema de prueba 1

## II. Demandas de potencia nodal del sistema.

<b>Nodo</b>	<b>S [VA]</b>	<b>P [W]</b>	<b>Q [VAr]</b>
1	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
2	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
3	1.581.138,83	1.500.000	500.000
4	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
5	3.298.484,50	3.200.000	800.000
6	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
7	5.700.877,13	5.500.000	1.500.000
8	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
9	4.123.105,63	4.000.000	1.000.000
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

Tabla 2 – Demandas nodales sistema de prueba 1

### III. Datos líneas eléctricas.

Nodo envío	Nodo recibo	Existente	Tipo	N° elemento	Longitud [Km]	R [Ohm/Km]	X [Ohm/Km]
10	1	1	1	1	1	0,8	0,45
1	2	1	1	2	0,6	0,8	0,45
10	3	1	1	3	1,3	0,8	0,45
3	4	0	0	4	0,2	0,8	0,45
1	5	0	0	5	0,3	0,8	0,45
2	6	0	0	6	0,5	0,8	0,45
3	7	0	0	7	0,2	0,8	0,45
7	8	0	0	8	0,25	0,8	0,45
6	9	0	0	9	0,4	0,8	0,45
10	5	0	0	10	1,5	0,8	0,45
11	4	0	0	11	0,7	0,8	0,45
11	5	0	0	12	0,6	0,8	0,45
11	6	0	0	13	0,8	0,8	0,45
12	8	0	0	14	0,7	0,8	0,45
12	9	0	0	15	0,9	0,8	0,45
12	11	0	0	16	0,9	0,8	0,45

Tabla 3 – Datos líneas sistema de prueba 1

### IV. Datos costos líneas.

Tipo	Costo Repotenciar [M\$/Km]	Costo Inversión [M\$/Km]	Imáx [A]	R [Ohm/Km]	X [Ohm/Km]
1	20	40	454,54	0,8	0,45
2	25	50	606,06	0,65	0,42
3	40	80	909,08	0,52	0,38
4	60	120	1893,94	0,4	0,34

Tabla 4 – Costos líneas sistema de prueba 1



## V. Datos subestaciones.

Tipo	Costo Repotenciar [M\$]	Costo Inversión [M\$]	P [W]	S [VA]	Q [VAr]
1	400	800	20000000	23529411,8	12394886,8
2	750	1200	30000000	35294117,6	18592330,2

Tabla 5 – Datos subestaciones sistema de prueba 1

## VI. Datos generadores distribuidos.

Tipo	Costo Inversión [M\$]	CAPACIDAD [W]	S [VA]	Q [VAr]
1	325	5250000	6176470,588	3253657,777
2	450	7500000	8823529,412	4648082,538
3	674	9860000	11600000	6110679,177
4	898	12000000	14117647,06	7436932,061
5	1022	16500000	19411764,71	10225781,58

Tabla 6 – Datos generadores sistema de prueba 1

## Anexo 2 - Datos sistema de prueba II

---

### I. Valores técnicos del sistema.

<b>Vbase [kV]</b>	28
<b>Vmax [pu]</b>	1,05
<b>Vmin [pu]</b>	0,95
<b>Sbase [MVA]</b>	10
<b>Periodo de planeamiento 1 etapa [Años]</b>	5
<b>Periodo de planeamiento 2 etapa [Años]</b>	5
<b>Costo Energía [\$/kW-h]</b>	250

Tabla 7 - Valores técnicos sistema de prueba 2

### II. Demandas de potencia nodal del sistema.

<b>Nodo</b>	<b>S [VA]</b>	<b>P [W]</b>	<b>Q [VAr]</b>
1	4.023.692	3.900.000	990.000
2	1.375.000	1.100.000	825.000
3	500.000	400.000	300.000
4	1.750.000	1.400.000	1.050.000
5	2.500.000	2.000.000	1.500.000
6	2.638.655	2.600.000	450.000
7	250.000	200.000	150.000
8	1.875.000	1.500.000	1.125.000
9	2.375.000	1.900.000	1.425.000
10	2.500.000	2.000.000	1.500.000
11	250.000	200.000	150.000
12	1.250.000	1.000.000	750.000
13	2.016.340	1.900.000	675.000
14	1.000.000	800.000	600.000
15	1.677.051	1.500.000	750.000
16	1.625.000	1.300.000	975.000
17	2.250.000	1.800.000	1.350.000
18	4.501.111	4.500.000	100.000
19	2.527.969	2.500.000	375.000
20	0	0	0
21	1.209.339	1.200.000	150.000
22	0	0	0
23	0	0	0

Tabla 8 -Demandas nodales sistema de prueba 2, primera etapa

<b>Nodo</b>	<b>S [VA]</b>	<b>P [W]</b>	<b>Q [VAr]</b>
1	4.063.929	3.939.000	999.900
2	1.375.000	1.100.000	825.000
3	530.250	424.200	318.150
4	1.750.000	1.400.000	1.050.000
5	2.525.000	2.020.000	1.515.000
6	795.375	636.300	477.225
7	267.750	214.200	160.650
8	1.893.750	1.515.000	1.136.250
9	2.398.750	1.919.000	1.439.250
10	2.500.000	2.000.000	1.500.000
11	265.125	212.100	159.075
12	1.262.500	1.010.000	757.500
13	1.125.000	900.000	675.000
14	1.020.000	816.000	612.000
15	1.262.500	1.010.000	757.500
16	1.641.250	1.313.000	984.750
17	2.295.000	1.836.000	1.377.000
18	4.546.122	4.545.000	101.000
19	831.517	730.250	397.688
20	500.000	400.000	300.000
21	265.125	212.100	159.075
22	0	0	0
23	0	0	0
24	1.250.000	1.000.000	750.000
25	2.250.000	1.800.000	1.350.000
26	2.500.000	2.000.000	1.500.000
27	3.092.329	3.000.000	750.000
28	1.250.000	1.000.000	750.000
29	1.250.000	1.000.000	750.000
30	1.588.238	1.400.000	750.000
31	1.250.000	1.000.000	750.000
32	6.542.201	6.480.000	900.000
33	1.720.465	1.400.000	1.000.000
34	0	0	0
35	1.000.000	800.000	600.000
36	4.295.346	4.200.000	900.000
37	7.615.773	7.000.000	3.000.000
38	2.012.461	1.800.000	900.000
39	7.017.834	7.000.000	500.000
40	2.250.000	1.800.000	1.350.000

41	5.614.268	5.600.000	400.000
42	500.000	400.000	300.000
43	3.354.102	3.000.000	1.500.000
44	3.080.584	3.000.000	700.000
45	2.000.000	1.600.000	1.200.000
46	2.500.000	2.000.000	1.500.000
47	750.000	600.000	450.000
48	0	0	0
49	1.250.000	1.000.000	750.000
50	1.250.000	1.000.000	750.000
51	0	0	0
52	1.250.000	1.000.000	750.000
53	0	0	0
54	0	0	0

Tabla 9 -Demandas nodales sistema de prueba 2, segunda etapa

### III. Datos líneas eléctricas.

Nodo Envío	Nodo Recibo	Existente	Tipo	N° elemento	Longitud [Km]	R [Ohm/Km]	X [Ohm/Km]
22	1	1	2	1	2,81	0,2921	0,2466
22	3	1	2	2	2,18	0,2921	0,2466
3	4	1	1	3	3,12	0,3655	0,252
4	7	1	1	4	2,5	0,3655	0,252
4	5	1	1	5	3,12	0,3655	0,252
5	6	1	1	6	2,5	0,3655	0,252
1	9	1	1	7	3,43	0,3655	0,252
23	14	1	1	8	3,75	0,3655	0,252
23	11	1	1	9	2,81	0,3655	0,252
11	12	1	1	10	3,12	0,3655	0,252
14	21	1	1	11	3,12	0,3655	0,252
14	15	0	0	12	3,75	0,3655	0,252
15	16	0	0	13	2,81	0,3655	0,252
12	13	0	0	14	4,37	0,3655	0,252
17	8	0	0	15	4,68	0,3655	0,252
7	8	0	0	16	3,12	0,3655	0,252
1	2	0	0	17	3,12	0,3655	0,252

9	10	0	0	18	7,18	0,3655	0,252
18	19	0	0	19	2,5	0,3655	0,252
19	20	0	0	20	3,75	0,3655	0,252
20	21	0	0	21	2,18	0,3655	0,252
2	10	0	0	22	5,2	0,3655	0,252
2	17	0	0	23	6,5	0,3655	0,252
2	8	0	0	24	8,3	0,3655	0,252
2	22	0	0	25	4,5	0,3655	0,252
11	13	0	0	26	3,5	0,3655	0,252
13	16	0	0	27	8,1	0,3655	0,252
16	23	0	0	28	7,2	0,3655	0,252
15	23	0	0	29	3,6	0,3655	0,252
16	18	0	0	30	5	0,3655	0,252
18	21	0	0	31	7,6	0,3655	0,252

**Tabla 10 -Datos líneas sistema de prueba 2, primera etapa**

<b>Nodo envío</b>	<b>Nodo recibo</b>	<b>Existente</b>	<b>Tipo</b>	<b>N° elemento</b>	<b>Longitud [Km]</b>	<b>R [Ohm/Km]</b>	<b>X [Ohm/Km]</b>
22	1	1	2	1	2,81	0,2921	0,2466
22	3	1	2	2	2,18	0,2921	0,2466
3	4	1	1	3	3,12	0,3655	0,252
4	7	1	1	4	2,5	0,3655	0,252
4	5	1	1	5	3,12	0,3655	0,252
5	6	1	1	6	2,5	0,3655	0,252
1	9	1	1	7	3,43	0,3655	0,252
23	14	1	1	8	3,75	0,3655	0,252
23	11	1	1	9	2,81	0,3655	0,252
11	12	1	1	10	3,12	0,3655	0,252
14	21	1	1	11	3,12	0,3655	0,252
15	16	1	1	12	2,81	0,3655	0,252
7	8	1	1	13	3,12	0,3655	0,252
18	19	1	1	14	2,5	0,3655	0,252
2	10	1	1	15	5,2	0,3655	0,252
2	17	1	1	16	6,5	0,3655	0,252
2	22	1	2	17	4,5	0,3655	0,252
11	13	1	1	18	3,5	0,3655	0,252
15	23	1	1	19	3,6	0,3655	0,252
16	18	1	1	20	5	0,3655	0,252
14	15	0	0	21	3,75	0,3655	0,252
12	13	0	0	22	4,37	0,3655	0,252

17	8	0	0	23	4,68	0,3655	0,252
1	2	0	0	24	3,12	0,3655	0,252
9	10	0	0	25	7,18	0,3655	0,252
19	20	0	0	26	3,75	0,3655	0,252
20	21	0	0	27	2,18	0,3655	0,252
2	8	0	0	28	8,3	0,3655	0,252
13	16	0	0	29	8,1	0,3655	0,252
16	23	0	0	30	7,2	0,3655	0,252
18	21	0	0	31	7,6	0,3655	0,252
6	35	0	0	32	5	0,3655	0,252
8	34	0	0	33	3,75	0,3655	0,252
9	24	0	0	34	4,3	0,3655	0,252
9	29	0	0	35	4,68	0,3655	0,252
11	50	0	0	36	2,5	0,3655	0,252
13	48	0	0	37	3,75	0,3655	0,252
17	40	0	0	38	1,87	0,3655	0,252
18	52	0	0	39	3,12	0,3655	0,252
24	25	0	0	40	4,06	0,3655	0,252
25	26	0	0	41	2,5	0,3655	0,252
25	28	0	0	42	3,12	0,3655	0,252
26	27	0	0	43	3,12	0,3655	0,252
29	30	0	0	44	3,43	0,3655	0,252
30	31	0	0	45	2,81	0,3655	0,252
31	32	0	0	46	2,18	0,3655	0,252
32	8	0	0	47	2,81	0,3655	0,252
34	33	0	0	48	3,43	0,3655	0,252
34	35	0	0	49	3,12	0,3655	0,252
37	36	0	0	50	3,12	0,3655	0,252
37	48	0	0	51	4,06	0,3655	0,252
38	10	0	0	52	3,12	0,3655	0,252
40	41	0	0	53	2,18	0,3655	0,252
41	42	0	0	54	2,18	0,3655	0,252
43	38	0	0	55	1,87	0,3655	0,252
44	45	0	0	56	3,43	0,3655	0,252
45	39	0	0	57	4,06	0,3655	0,252
45	17	0	0	58	2,81	0,3655	0,252
46	16	0	0	59	2,5	0,3655	0,252
47	46	0	0	60	2,5	0,3655	0,252
47	18	0	0	61	3,75	0,3655	0,252
48	43	0	0	62	2,5	0,3655	0,252
49	44	0	0	63	3,12	0,3655	0,252

50	49	0	0	64	2,18	0,3655	0,252
51	14	0	0	65	3,43	0,3655	0,252
52	51	0	0	66	3,12	0,3655	0,252
53	42	0	0	67	2,5	0,3655	0,252
53	35	0	0	68	3,12	0,3655	0,252
53	47	0	0	69	3,12	0,3655	0,252
54	28	0	0	70	2,5	0,3655	0,252
54	29	0	0	71	3,75	0,3655	0,252
54	37	0	0	72	2,81	0,3655	0,252

**Tabla 11 -Datos líneas sistema de prueba 2, segunda etapa**

**IV. Datos costos líneas.**

Tipo	Costo Repotenciar [M\$/Km]	Costo Inversión [M\$/Km]	Imax [A]	R [Ohm/Km]	X [Ohm/Km]
1	30	70	185,58	0,3655	0,252
2	70	135	391,77	0,1827	0,126
3	80	150	461,88	0,146	0,1233
4	100	180	577,35	0,0966	0,114

**Tabla 12 – Costos líneas sistema de prueba 2**

**V. Datos subestaciones.**

Tipo	Costo Repotenciar [M\$]	Costo Inversión [M\$]	Capacidad [W]	S [VA]	Q [VAr]
1	250	400	15000000	17647058,8	9296165,08
2	360	600	30000000	35294117,6	18592330,2
3	480	800	40000000	47058823,5	24789773,5

**Tabla 13 – Datos subestaciones sistema de prueba 2**

## VI. Datos generadores distribuidos.

Tipo	Costo Inversión [M\$]	CAPACIDAD [W]	S [VA]	Q [VAr]
1	325	3250000	3823529,41	2014169,1
2	450	5500000	6470588,24	3408593,86
3	600	7860000	9247058,82	4871190,5

Tabla 14 – Datos generadores sistema de prueba 2, primera etapa

Tipo	Costo Inversión [M\$]	CAPACIDAD [W]	S [VA]	Q [VAr]
1	325	3250000	3823529,41	2014169,10
2	450	5500000	6470588,24	3408593,86
3	600	7860000	9247058,82	4871190,50
4	850	9500000	11176470,6	5887571,21

Tabla 15 – Datos generadores sistema de prueba 2, segunda etapa