

PLANEAMIENTO DE REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO UN
ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN COLONIA DE HORMIGAS

OSCAR ANDRÉS MARROQUÍN OROZCO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

2008

PLANEAMIENTO DE REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO UN
ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN COLONIA DE HORMIGAS

Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de
Ingeniero Electricista.

OSCAR ANDRÉS MARROQUÍN OROZCO

Director

MSc. ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

2008

Agosto 2008

Nota de aceptación:

PhD. Ramón Alfonso Gallego Rendón

Firma del Jurado

MSc. Alejandro Garcés Ruiz

Firma del Director

Resumen

En este trabajo el problema de planeamiento de redes secundaria se formula en función de los costos fijos y variables, implicados en el planeamiento real. Para el cálculo de las pérdidas en la red se tiene en cuenta la curva de carga de los tipos de usuario involucrados en las redes de estudio de tal forma que se encuentran resultados más acordes a la realidad del sistema. Se consideraron como variables para el planeamiento la selección de conductores y balance de cargas. Para la solución del problema se propone una metodología de optimización basada en colonia de hormigas; un esquema de codificación mapea las posibles soluciones que son avaladas por medio de un algoritmo eficiente de flujo de carga radial.

Índice General

Índice General.....	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	VIII
Introducción.....	1
1.1 Objetivo General.....	3
1.2 Objetivos Específicos.	3
1.3 Estructura del Trabajo.	4
Planeamiento de Redes Secundarias	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Revisión Bibliográfica.....	7
2.3 Características de una Red Secundaria de Distribución.....	9
2.4 Descripción del Problema.....	9
2.4.1 Desbalance de carga de la red.....	11
2.4.2 Selección de los conductores.....	11
2.5 Curva de carga.....	12
2.6 Modelo Matemático.....	14
Metodología Colonia de Hormigas.....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 El Problema del Vendedor Viajante	20
3.3 Ant System Aplicado al TSP.....	22
3.3.1 Descripción.....	22

Metodología Propuesta	25
4.1 Flujo de Carga	27
4.1.1 Barrido iterativo.....	28
4.1.1.1 Barrido de corrientes.....	28
4.1.1.2 Barrido de voltajes.....	29
4.2 Ant system aplicado al planeamiento de redes secundarias.....	30
4.2.1. Esquema de codificación.....	30
4.2.2. Decisión probabilística.....	33
4.2.2.1. Matriz de feromonas.....	34
4.2.2.2. Valor heurístico.....	35
4.2.3. Modificación al algoritmo original.....	35
4.2.4. Pseudocódigo.....	36
Resultados.....	37
5.1 Circuito 1.....	39
5.2 Circuito 2.....	42
5.3 Circuito 3.....	46
5.4 Circuito 4.....	48
5.3 Comportamiento del Algoritmo.....	51
5.4 Análisis de confiabilidad del Algoritmo.....	53
Conclusiones y Recomendaciones	54
6.1 Futuros trabajos de investigación.....	55
Bibliografía.....	56
Apéndice.....	58
A. Sistemas de prueba	58
A.1 Circuito 1.....	58
A.2 Circuito 2.....	59
A.3 Circuito 3.....	60
A.4 Circuito 4.....	61

Índice de Figuras

Figura 2.1: Curva de carga usuario residencial.....	13
Figura 2.2: Curva de carga usuario comercial.....	13
Figura 3.1: Comportamiento de las hormigas reales.....	18
Figura 3.2: Representación gráfica del TSP.....	21
Figura 4.1: Esquema de codificación.....	31
Figura 4.2: Red secundaria de distribución.....	32
Figura 4.3: Datos de entrada: topología de la red.....	32
Figura 4.4: Datos de entrada: Distribución de cargas por fase.....	33
Figura 4.5: Ejemplo red base.....	33
Figura 4.6: Matriz de feromonas para balance de fases.....	34
Figura 4.7: Matriz de feromonas para selección del conductor.....	35
Figura 5.1: Topología red de prueba #1.....	39
Figura 5.2: Topología red de prueba #2.....	43
Figura 5.3: Topología red de prueba #3.....	46
Figura 5.4: Topología red de prueba #4.....	48
Figura 5.5: Comportamiento del algoritmo.....	51
Figura 5.6: Comportamiento del algoritmo.....	52
Figura 5.7: Histograma de resultados.....	53

Índice de Tablas

Tabla 5.1: Parámetros colonia de hormigas.	38
Tabla 5.2: Costos fijos y variables.	38
Tabla 5.3: Curvas de carga.	39
Tabla 5.4: Valores de tensión en los nodos red de prueba #1.	40
Tabla 5.5: distribución de cargas en las fases red de prueba #1.	40
Tabla 5.6: Costo total red de prueba #1.	41
Tabla 5.7: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #1.	41
Tabla 5.8: Valores de tensión en los nodos red de prueba #1.	42
Tabla 5.9: distribución de cargas en las fases red de prueba #1.	42
Tabla 5.10: Costo total red de prueba #1.	42
Tabla 5.11: Valores de tensión en los nodos red de prueba #2.	43
Tabla 5.12: distribución de cargas en las fases red de prueba #2.	44
Tabla 5.13: Costo total red de prueba #2.	44
Tabla 5.14: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #2.	45
Tabla 5.15: Valores de tensión en los nodos red de prueba #2.	45
Tabla 5.16: distribución de cargas en las fases red de prueba #2.	45
Tabla 5.17: Costo total red de prueba #2.	46
Tabla 5.18: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #3.	47
Tabla 5.19: Valores de tensión en los nodos red de prueba #3.	47
Tabla 5.20: distribución de cargas en las fases red de prueba #3.	48
Tabla 5.21: Costo total red de prueba #3.	48
Tabla 5.22: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #4.	49
Tabla 5.23: Valores de tensión en los nodos red de prueba #4.	50

Tabla 5.24: distribución de cargas en las fases red de prueba #4.	50
Tabla 5.25: Costo total red de prueba #4.	50
Tabla A1: Conductores utilizados circuito de prueba 1.....	58
Tabla A.2: Red base circuito de prueba 1.	59
Tabla A.3: Distribución de cargas red base circuito de prueba 1.	59
Tabla A.4: Red base circuito de prueba 2.	60
Tabla A.5: Distribución de cargas red base circuito de prueba 2.	60
Tabla A.6: Red base circuito de prueba 3.	60
Tabla A.7: Distribución de cargas red base circuito de prueba 3.	61
Tabla A.8: Red base circuito de prueba 4.	62
Tabla A.9: Distribución de cargas red base circuito de prueba 4.	62

Capítulo 1

Introducción

El aumento del consumo de energía eléctrica, debido a la creación de nuevas áreas residenciales, comerciales o industriales cuya demanda debe ser atendida, hace del problema de planeamiento de redes de distribución secundarias uno de los más importantes para las compañías de distribución de energía.

El estudio de la expansión de redes secundaria de distribución es de vital importancia para las empresas distribuidoras de energía eléctrica, dado que es en esta parte del sistema donde se concentran la mayor cantidad de perdidas. Es un problema donde intervienen gran cantidad de variables de tipo económico y eléctrico que se debe resolver de manera óptima para asegurar a los usuarios la prestación de un mejor servicio con costo de inversión viable para las empresas.

Los estudios de expansión actualmente son basados en datos históricos, predicciones de la demanda futura, cálculos económicos y eléctricos que se deben llevar a cabo para obtener una solución apropiada al problema del planeamiento; no obstante en gran parte la decisión de cual es la solución óptima se basa en la experiencia y capacidad del ingeniero encargado del planeamiento. El desarrollo de estudios más elaborados basados en el uso de modelos matemáticos y técnicas de optimización pueden mejorar significativamente las soluciones tradicionales. En especial si se tiene en cuenta que el planeamiento en sistemas de distribución generalmente se realiza en tiempo real, es decir la necesidad se da en el momento y se construye en el momento, la clave esta en que lo que construye sea optimo.

La finalidad de todo estudio de planeamiento es encontrar la forma de brindar a los usuarios la atención de la demanda de energía, maximizando la confiabilidad, seguridad y calidad del servicio a un costo de inversión económicamente viable.

Algunas de las variables que se pueden manipular para encontrar una solución más eficiente al comportamiento de una red secundaria son:

- Balance de carga entre las fases.
- Dimensionamiento de conductores.
- Ubicación del transformador.

La aplicación de metodologías de planeamiento en las empresas de distribución tiene un impacto positivo en la calidad del servicio a los usuarios contribuyendo con niveles de tensión adecuados, un balance de fases correcto y disminuyendo las pérdidas de la red, de igual forma las empresas podrían ser beneficiadas económicamente con la optimización de los recursos económicos. Por lo anterior es importante desarrollar una metodología que encuentre buenas soluciones económicamente viables y técnicamente eficientes.

El algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas y apoyada en un algoritmo de flujo de carga para avalar la viabilidad eléctrica de los resultados, constituirían la herramienta principal en el proceso de planeamiento.

El planeamiento de redes secundarias de distribución consiste en minimizar los costos de operación e inversión buscando atender un conjunto de restricciones operacionales tales como la atención de la energía demandada por los usuarios con un nivel de tensión de acuerdo a los valores establecidos en la regulación.

Generalmente el problema de planeamiento de redes secundarias de distribución se puede establecer como:

- Minimizar costos de inversión, en el caso de la creación de una nueva red secundaria: dimensionamiento de conductores, transformadores, entre otros, o si

es el caso de expansión (conectar nuevos usuarios a una red existente) los costos de serían: instalación de nuevos equipos, cambio de conductores, entre otros.

- Minimizar costos operacionales referente a las pérdidas que se presenten a lo largo de la red secundaria durante el período de tiempo para el cual se está realizando el estudio de planeamiento.

Cumpliendo con:

- Restricciones de límites de caída de tensión: los valores de tensión entregados a los usuarios se deben mantener dentro de los límites establecidos por la CREG, evitando grandes variaciones de tensión que afecten la calidad del servicio.
- Restricciones físicas de operación de los equipos: los conductores y transformadores deben ser dimensionados de manera que el flujo de potencia máximo por ellos durante el periodo para el cual se realiza el planeamiento, no supere los valores establecidos por los fabricantes evitando así cualquier desgaste que pueda incurrir en un desmejoramiento del servicio.
- Restricciones financieras: los costos de inversión deben cumplir con el máximo recurso financiero disponibles para la expansión o instalación de la nueva red.

1.1 Objetivo General.

Desarrollar una metodología para el planeamiento de redes de distribución secundarias usando un método de optimización basado en colonia de hormigas.

1.2 Objetivos Específicos.

Alcanzar el estado del arte mediante la recopilación de bibliografía en la literatura especializada necesaria para desarrollar el tema de estudio.

Estudiar el método de optimización basados en colonia de hormigas.

Implementar computacionalmente un algoritmo de colonia de hormigas para el planeamiento de redes secundarias.

Desarrollar una herramienta de software con el fin de implementar la metodología propuesta.

Efectuar pruebas sobre una red de distribución secundaria.

1.3 Estructura del Trabajo.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo matemático propuesto para el planeamiento del sistema de distribución secundario. El modelo matemático es planteado con base en las siguientes condiciones: La función objetivo que involucra los costos de inversión y de operación, y las restricciones operativas de la red.

En el capítulo 3 se muestran las características de la metodología de optimización colonia de hormigas, la forma de utilizar la matriz de feromonas, el tipo de codificación empleado, entre otras. En el capítulo 4 se describe la forma se implemento el problema del planeamiento de redes secundarias usando colonia de hormigas. Además se discute el flujo de carga radial utilizado.

El capítulo 5 se describen los casos de prueba y se muestran los resultados obtenidos para varias redes secundarias de prueba, finalmente el capítulo 6 muestra las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Capítulo 2

Planeamiento de Redes Secundarias

2.1 Introducción.

La desregulación del sector eléctrico y el establecimiento de un mercado de energía ha permitido que exista competencia entre los diferentes agentes participantes (generadores, transmisores, distribuidores y comercializadores), lo cual ha originado una búsqueda continua de la eficiencia en todas las áreas del sistema de potencia, por lo cual se requiere que exista un equilibrio entre los recursos de generación y la demanda de potencia cumpliendo con criterios de calidad y eficiencia en la prestación del servicio (El congreso de Colombia, ley 142 de 1994 y ley 143 de 1994). Lo anterior implica que se debe producir un producto (energía) de calidad al mínimo costo, es decir que para alcanzar los mejores precios de energía se debe realizar un planeamiento óptimo de la expansión en todos los campos involucrados en el proceso.

Las redes de distribución secundaria son el último eslabón en la cadena que compone los sistemas eléctricos que se encuentran divididos en cuatro subsistemas a saber: generación, transmisión, subtransmisión y distribución. El proceso de generación de energía eléctrica se basa en la transformación de un tipo de energía (química, mecánica, térmica, luminosa) en energía eléctrica. Para dicho proceso de transformación de energía, se acude a las centrales eléctricas de generación. La energía producida es transportada a todo el sistema por medio de la red de transmisión; la cual se encarga de trasladar la potencia de los grandes centros de generación a los centros de consumo. La transmisión de energía eléctrica en Colombia se realiza en niveles de 230 y 500KV. Estos valores son elevados debido al factor distancia existente entre los puntos de generación y consumo. Debido a ello se pretende transmitir energía eléctrica con

tensiones muy elevadas para reducir de esta manera las pérdidas en las líneas de transmisión. El sistema de subtransmisión se diferencia del de transmisión por los niveles de tensión (normalmente 115kV) y hace de puente comunicante entre el sistema de transmisión y el sistema de distribución. Debido a que los niveles de tensión requeridos en instalaciones residenciales, comerciales e industriales son relativamente bajos en comparación a los utilizados en transmisión, es necesario disminuir los valores de tensión de subtransmisión a través de transformadores de distribución.

Un sistema de distribución se divide en: red primaria y red secundaria, siendo la red primaria o de media tensión la encargada de llevar la energía eléctrica entre las subestaciones y los transformadores de distribución, la red secundaria o de baja tensión representa el enlace final con los consumidores, esta última será la que se estudia en este trabajo.

El planeamiento de sistemas de distribución es esencial para asegurarse que el crecimiento futuro de la demanda de energía eléctrica pueda ser satisfecho agregando elementos y equipos técnicamente adecuados, económicamente razonables y en el momento oportuno. Aunque se ha realizado un trabajo importante en la aplicación de algún tipo de aproximación sistemática para el planeamiento de los sistemas de generación y transmisión, no ha ocurrido lo mismo con los de distribución especialmente con las redes secundarias.

El planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica es un proceso de estudio y análisis que deben realizar las empresas distribuidoras para garantizar que el diseño de sus redes secundarias sea confiable y viable desde el punto de vista económico y operativo. Las empresas necesitan herramientas rápidas y económicas de planeamiento para evaluar la necesidad de nuevos elementos con el crecimiento de la demanda. El estudio de un sistema eléctrico, sea de transmisión o de distribución, se basa en el cálculo de las condiciones de operación de régimen permanente, como son: tensión en los diferentes nodos de la red, flujos de potencia, pérdidas, etc. En muchos casos, el análisis se realiza utilizando valores medios de demanda o demanda máxima multiplicada por un factor de pérdidas. Generalmente un sistema no opera con valores próximos a la demanda máxima durante todo el día, tornando los resultados del análisis algo distante de la realidad. En este trabajo se toma como periodo de planeamiento un

año, de modo que las pérdidas de energía diaria se calculan con base en una curva de carga discretizada en los 24 periodos del día, donde cada tipo de usuario (comercial o residencial) cuenta con una curva de carga que refleja el comportamiento real de su demanda a lo largo del día. De esta forma el cálculo de las pérdidas de energía que representan la función objetivo abordada en este trabajo, presenta resultados más acordes a la realidad.

Estudios de esta naturaleza son de gran importancia en sistemas ya existentes, en procura de resolver problemas de operación económica, regulación de tensión, características de cargas, etc. Como también en el planeamiento de nuevas redes para verificar el comportamiento de los elementos frente a las diferentes alternativas de configuración.

2.2 Revisión Bibliográfica.

El problema de la explosión combinatoria se encuentra en situaciones donde dado un conjunto de elementos se pueden obtener diferentes arreglos ordenados de estos, permitiendo una vasta cantidad de posibilidades. Los intentos por tratar con el problema han encontrado muchos obstáculos, por ejemplo, no es suficiente contar con un conocimiento experto para manejarlos de manera efectiva. Así mismo, no es suficiente confiar en la velocidad de procesamiento de una computadora, con el objeto de buscar la solución del problema de manera exhaustiva, en el conjunto de posibilidades dado su rápido crecimiento (exponencial) con el tamaño del problema.

En la actualidad, la investigación de este tipo de problemas se ha dirigido hacia el diseño de buenas heurísticas, es decir, algoritmos eficientes con respecto al tiempo de cómputo y al espacio de memoria, y con cierta verosimilitud de entregar una solución buena, esto es, relativamente cercana a la óptima, mediante el examen de un subconjunto relativamente pequeño de soluciones del dominio de definición del problema. La observación de la naturaleza ha sido una de las principales fuentes de inspiración para la propuesta de nuevos paradigmas computacionales. La gran variedad de problemas de optimización que ésta presenta, tales como: la supervivencia, la

evolución de las especies, la búsqueda del camino crítico, entre otros, sugirieron diversos algoritmos computacionales que se inspiran en procesos naturales.

Varios métodos han sido empleados en el estudio del planeamiento óptimo de redes primarias y secundarias de distribución: Optimización clásica Branch-And-Bound [12], modelos de transporte y descomposición de benders [13], métodos heurísticos y actualmente meta-heurísticos - Algoritmos Genéticos [2], [3], y [14], Simulated Annealing [15] y Busca Tabú [4] y [16].

Dentro de la línea de investigación que utiliza los métodos heurísticos para la optimización de sistemas de distribución secundarios se destaca el trabajo de Cossi [2], que utiliza una los algoritmos genéticos introducidos por Holland [6] en 1970 inspirándose en el proceso observado en la evolución natural de los seres vivos, para dar solución al problema de planeamiento de redes secundarias, formulado como un problema de programación no lineal entero mixto. La función objetivo considera los costos de inversión para el cambio de conductores, ubicación del transformador y balance de cargas, además de los costos de operación relacionados con las pérdidas de energía.

Utilizando otra de las metodologías heurísticas más comunes, Franco [4] desarrolló una metodología para la solución del problema del planeamiento de sistemas de distribución, bajo un modelamiento no lineal, aplicando la técnica de optimización combinatorial Búsqueda Tabú propuesta por Glover [7], para encontrar soluciones de excelente calidad, que representen mínimos costos totales en el sistema y satisfagan las restricciones consideradas.

El Templado Simulado [9], cuyo origen está en los procedimientos físicos de solidificación controlada, que consisten en calentar un sólido hasta que se funde, y seguidamente, ir enfriándolo de forma que cristalice en una estructura perfecta, sin malformaciones locales; fue implementado por Jinxiang Zhu et al. [15] al problema del desequilibrio de cargas. Aquí, el problema de balance de fases es tratado como un problema de programación entero no-lineal con una función de costos que busca minimizar las pérdidas de energía.

2.3 Características de una Red Secundaria de Distribución.

Las redes de distribución, sean redes primarias o secundarias, presentan características particulares que las diferencian de las redes de transmisión: topología radial, múltiples conexiones, cargas de distinta naturaleza, líneas con resistencia comparable a la reactancia y no presentan transposiciones.

Las redes de distribución secundarias son típicamente radiales, esto es, que existe un solo camino entre el transformador de distribución y el consumidor final. En algunos casos es posible encontrarse con redes de topología enmallada, sin embargo en el presente trabajo no se tendrán en cuenta.

Las cargas en un alimentador secundario son generalmente desbalanceadas, debido a que la conexión a la red de los usuarios residenciales y comerciales (en los que se enfoca este trabajo), es una conexión monofásica, además de la gran diversidad en el comportamiento de la demanda de cada usuario.

En los sistemas de distribución de energía la resistencia de las líneas es comparable a su reactancia. Generalmente la relación X/R tiene una amplia franja de variación dependiendo del conductor utilizado. Caso contrario al que se presenta en transmisión donde los valores de la resistencia son muy bajos con respecto a la reactancia.

Para las empresas de distribución de energía la disminución de las pérdidas es una tarea necesaria, tanto en el aspecto económico como en el operacional de sus redes. Un porcentaje importante de las pérdidas de un sistema eléctrico de distribución, tiene su origen en las redes secundarias.

2.4 Descripción del Problema.

Un mal planeamiento de un sistema de distribución de energía eléctrica puede ocasionar problemas económicos representados en sobrecostos y problemas técnicos debidos a un mal dimensionamiento de los Transformadores de distribución y alimentadores secundarios, causando niveles de tensión indeseables y pérdida de la confiabilidad en el

servicio. Una expansión del sistema que no ha sido convenientemente planeada puede significar un incremento en la inversión y un aumento en el costo de operación del sistema.

Los aspectos involucrados en el planeamiento de las redes primarias de los sistemas de distribución incluyen la proyección de la demanda, la expansión de las subestaciones, la selección de la mejor ubicación y potencia de estas (cuando se trata de agregar una nueva en un sistema existente o cuando se debe diseñar un sistema completo), el planeamiento de los alimentadores, etc.

El problema del planeamiento del sistema de distribución en cuanto a la red secundaria consiste en determinar los cambios en el sistema necesarios para atender la demanda creciente. Debido a la gran diversidad en el comportamiento de la demanda en los consumidores finales uno de los mayores retos que se afrontan al momento de realizar el planeamiento consiste en encontrar un balance ideal entre las cargas conectadas a cada una de las fases de la red secundaria. Los problemas a resolver son:

- La repotenciación de transformadores de distribución existentes.
- La ubicación y dimensionamiento de nuevos transformadores.
- La repotenciación de alimentadores secundarios existentes.
- La localización y selección del tipo para alimentadores secundarios nuevos.
- Modificación de la topología de la red secundaria (reconfiguración).

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

- Capacidad de potencia en transformadores y alimentadores secundarios.
- Límites mínimos y máximos de tensión en los nodos.

En este trabajo se considera que se cuenta con la estimación del crecimiento de la demanda sobre el horizonte de planeamiento, la topología del sistema (ubicación del

transformador y distribución de las cargas en los nodos de la red secundaria) y por lo tanto se realiza el planeamiento enfocado a balancear las cargas y dimensionar los conductores a utilizar buscando minimizar los costos de inversión y operación, cumpliendo con los requisitos de calidad en la prestación del servicio. En general se trata de un problema bastante complejo, debido, entre otras razones a que existe una gran cantidad de variables y restricciones, además de la no linealidad en las funciones de costo implicadas.

2.4.1 Desbalance de carga de la red.

Las diferencias en las características de consumo de los clientes y la topología de la red, producen desequilibrio en la carga de la red eléctrica. Como las pérdidas en una línea son proporcionales al cuadrado del flujo de corriente, un desequilibrio en la carga producirá un mayor flujo de corriente por una fase, lo cual derivará en un aumento en las pérdidas de potencia por dicha fase, este aumento es mas significativo que el efecto provocado por el menor flujo de corriente en la o fases restantes, por lo tanto, al aumentar el desequilibrio de la carga de la red se producirá un incremento de tipo cuadrático de las pérdidas.

El problema consiste en la modificación de las conexiones de las diferentes cargas en un alimentador secundario de tal forma que se minimicen las pérdidas de potencia activa causadas por la diferencia en flujo de corriente en cada fase. Idealmente la mejor solución posible consiste en un balance total del sistema, sin embargo, esta alternativa en la práctica es imposible dadas las características implícitas de los sistemas de distribución.

2.4.2 Selección de los conductores.

El tipo de conductor utilizado para tender la red secundaria es probablemente el factor mas complicado cuando se trata de realizar un balance entre costos de operación y costos de inversión; debido a que la resistencia eléctrica esta relacionada directamente al calibre del conductor y el calibre del conductor directamente relacionado con los costos.

En pocas palabras cuanto mas económico sea el conductor seleccionado, mayores perdidas de energía se generarán.

El problema se basa entonces en seleccionar el conductor óptimo para cada tramo de línea, de modo que entre menor sea flujo de carga el conductor podrá ser de menor calibre, de modo que la reducción en los costos de inversión no se traduzca en costos de operación superiores.

2.5 Curva de carga.

Un buen planeamiento de un sistema eléctrico debe comenzar con el estudio de las características de los consumidores, por lo general los análisis de perdidas en una red de distribución se realiza tomando la demanda máxima de los usuarios y se asume esta para todo el periodo de estudio multiplicándola por un factor de perdidas; realizando así una aproximación a las perdidas totales del sistema en un tiempo determinado. Esta metodología es poco conveniente debido a que las cargas conectadas a una red secundaria son de distinta naturaleza, es muy diferente las características de consumo que presentan cada uno de los tipos de usuario (residencial, comercial e industrial), por lo tanto el resultado obtenido dista un poco de la realidad.

Existe otra metodología la cual era implementada en el presente trabajo, que consiste en modelar de manera mas especifica los hábitos de consumo de cada tipo de usuario por medio de la utilización de curvas de carga; consiste en un grafico que indica la demanda de potencia (u otra variable en estudio), de un consumidor en cada instante de tiempo durante un periodo determinado.

Las curvas de carga pueden ser diarias, mensuales o anuales; en este trabajo se utilizan curvas de carga diarias con valores de potencia discretizados en los 24 periodos del día. Se tiene una curva de carga para cada tipo de usuario:

La curva de carga de un consumidor residencial se caracteriza por un consumo relativamente variable durante todo el día con fuertes incrementos en las horas donde típicamente se utilizan las estufas eléctricas y con un aumento significativo al final de la

tarde conocido como la demanda pico, provocado por el uso de estufas eléctricas e iluminación entre las horas 18 a 21.

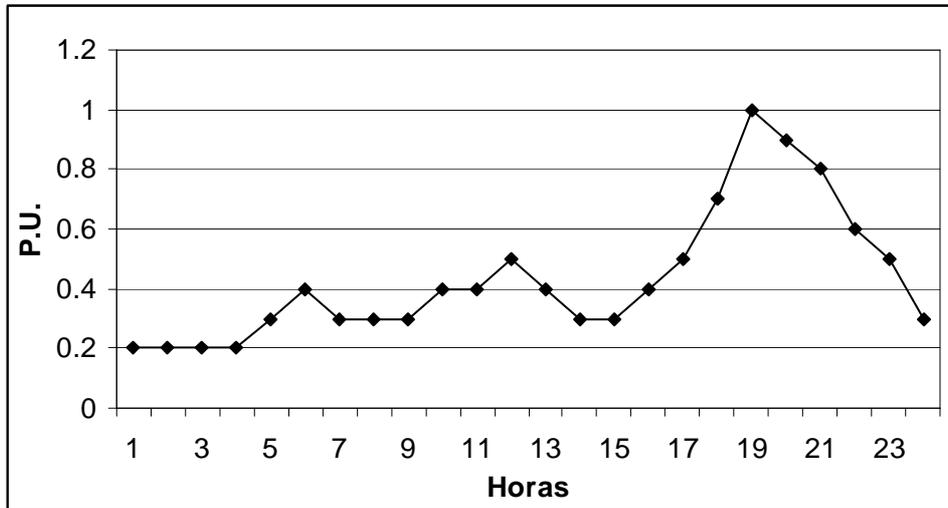


Figura 2.1: Curva de carga usuario residencial.

La curva de carga de un usuario comercial se caracteriza por tener su demanda máxima durante el horario comercial con una leve disminución en el horario de almuerzo. Fuera del horario comercial la demanda de este tipo de usuario se utiliza para iluminación y refrigeración.

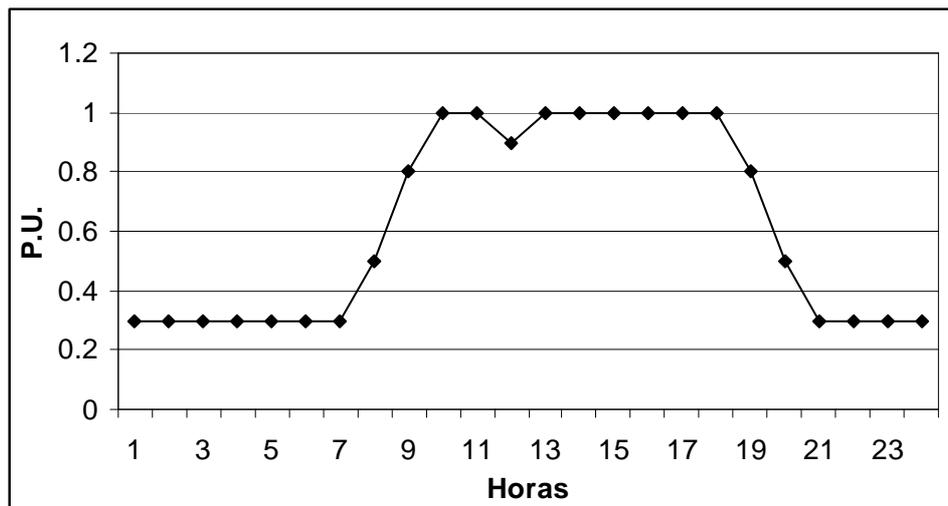


Figura 2.2: Curva de carga usuario comercial.

2.6 Modelo Matemático.

El objetivo del planeamiento es proponer un plan de expansión con un mínimo costo cumpliendo con las restricciones técnicas y de operación. La función objetivo tiene entonces dos componentes: costos de inversión, que se conocen como los costos fijos, y los costos de pérdidas, que se conocen como los costos variables. En este trabajo se consideran como costos fijos los elementos y los costos de construcción o mano de obra necesarios. Se presentan costos fijos cuando se hace necesario:

- Repotenciar (aumento de calibre del conductor) los alimentadores existentes.
- construir nuevos alimentadores.

Dada la relativa simplicidad en el proceso necesario para realizar el balance de cargas no se consideran costos fijos asociados a este.

Los costos variables se asumirán como las pérdidas de potencia activa que ocurren en la red durante el periodo para el cual se está realizando el planeamiento. Estos costos se expresan en términos de los flujos de potencia al cuadrado a través de los alimentadores, lo que conlleva a una función objetivo con costos no lineales.

El modelo básico se puede expresar como:

$$\min w = C_{kWh} * T * \sum_{k=1}^M \sum_{t=1}^{24} (R_k * |I_{kt}|^2) + \sum_{k=1}^M (C_{RK} * X_i + C_{Ck} * Y_i) \quad (2.1)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (2.2)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (2.3)$$

$$P_n = f_p(V, \theta) \quad (2.4)$$

$$Q_n = f_q(V, \theta)$$

Siendo:

- W : Función objetivo en Miles \$.
- M : número de tramos de línea en la red secundaria.
- C_{kWh} : Costo kWh en Miles \$.
- T : Periodo de planeamiento.
- R_k : Resistencia del conductor del tramo k .
- I_{kt} : corriente a través del tramo k en el periodo t .
- C_{Rk} : Costo de repotenciación del conductor en el tramo k .
- X_i : Booleano que indica si el tramo k debe ser repotenciado.
- C_{Ck} : Costo de construcción del conductor en el tramo k .
- Y_i : Booleano que indica si el tramo k debe ser construido.
- V_i : Tensión en el nodo i .
- S_{ij} : Flujo de potencia en el tramo de línea ij .
- P_n : Potencia activa en el nodo n .
- Q_n : Potencia reactiva en el nodo n .

Función objetivo (ecuación 2.1): Incluye los costos fijos y variables de los elementos que componen la red secundaria. La solución del problema buscará minimizar esta función a partir de una configuración inicial de la red.

Regulación de tensión (ecuación 2.2): Esta restricción asegura que el perfil de tensión para cada nodo del circuito se mantenga dentro de los límites establecidos en la regulación. El nivel de la tensión en los usuarios finales es de gran importancia para la calidad del servicio y en consecuencia un factor indispensable a considerar en el planeamiento de la red.

Máximo flujo de potencia por los conductores (ecuación 2.3): garantiza que a la intensidad de la corriente que circula por cada tramo de la red (existente o futuro) durante el periodo de planeamiento, se mantenga dentro de la capacidad admisible de cada conductor.

Las ecuaciones de flujo de carga (ecuación 2.4) garantizan el cumplimiento de las restricciones operativas.

Cada posible solución que se encuentre durante el proceso de optimización será evaluada por medio de un flujo de potencia. En caso de se presente alguna violación de las restricciones anteriores se penalizará la función objetivo. Así para cada solución a la función objetivo será de la forma:

$$Fa(x) = \begin{cases} F(x) & \text{Si } a \text{ es una solución factible} \\ F(x) + pen(x) & \text{Si } a \text{ no es factible} \end{cases} \quad (2.5)$$

Para la estimación de las pérdidas en los circuitos de distribución, se deben tener modelos adecuados para cada uno de los elementos que hacen parte del sistema, donde primero se debe modelar y obtener las características de las cargas; por tal razón la utilización de curvas de carga para cada usuario implementada en el presente trabajo representa una gran ventaja con respecto a otras investigaciones similares permitiendo mejorar los criterios de mínimo costo y máxima cargabilidad sin pérdida de vida útil de los elementos.

Capítulo 3

Metodología Colonia de Hormigas

3.1 Introducción

Ant System (AS) es una innovadora técnica basada en agentes muy simples llamados hormigas, nació con la tesis doctoral de Marco Dorigo (1992) [11]. *Ant System* (AS) es el primer algoritmo desarrollado en el área ACO: *Ant Colony Optimization*. En ésta se estudian sistemas artificiales que simulan colonias de hormigas reales, de donde toman su inspiración. Resulta fascinante entender como animales casi ciegos, moviéndose aproximadamente al azar, pueden encontrar el camino más corto desde su nido hasta la fuente de alimentos y regresar. Para esto, cuando una hormiga se mueve, deja una señal odorífera, depositando una sustancia denominada feromona, para que las demás puedan seguirla.

En la naturaleza, las feromonas cumplen un importante papel en la organización y supervivencia de muchas especies. Así, representa un sistema de comunicación química entre animales de una misma especie, que transmiten información a través de señales odoríferas acerca del estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, sexo y parentesco del animal emisor, las cuales son recibidas en el sistema olfativo del animal receptor, quien interpreta esas señales.

Las feromonas, han sido más estudiadas en las llamadas especies inferiores como son las hormigas, las abejas y otros insectos. De hecho, los primeros estudios se realizaron en una polilla y el comportamiento asociado a este sistema de comunicación química. Asimismo, la palomilla del gusano de seda fue el primer animal en el que se estudió el sofisticado sistema olfativo para detectar las feromonas.

El ant system se enfoca en la aplicación de las feromonas secretadas por las hormigas para guiar a las demás en la búsqueda de alimentos. En principio, una hormiga aislada se mueve esencialmente al azar, pero las siguientes deciden con una buena probabilidad seguir el camino con mayor cantidad de feromonas.

Considere la Figura en donde se observa como las hormigas establecen el camino más corto. En el figura (a) las hormigas llegan al punto en que tienen que decidir por uno de los caminos que se les presenta; en (b) realizan la elección de manera aleatoria, algunas hormigas eligen el camino hacia arriba y otras hacia abajo; en (c) como las hormigas se mueven aproximadamente a una velocidad constante, las que eligieron el camino más corto alcanzarán el otro extremo más rápido que las otras que tomaron el camino más largo, depositando mayor cantidad de feromona por unidad de longitud; en (d) la cantidad de feromona depositada en el trayecto más corto hace que la mayoría de las hormigas elijan este camino, por realimentación positiva.

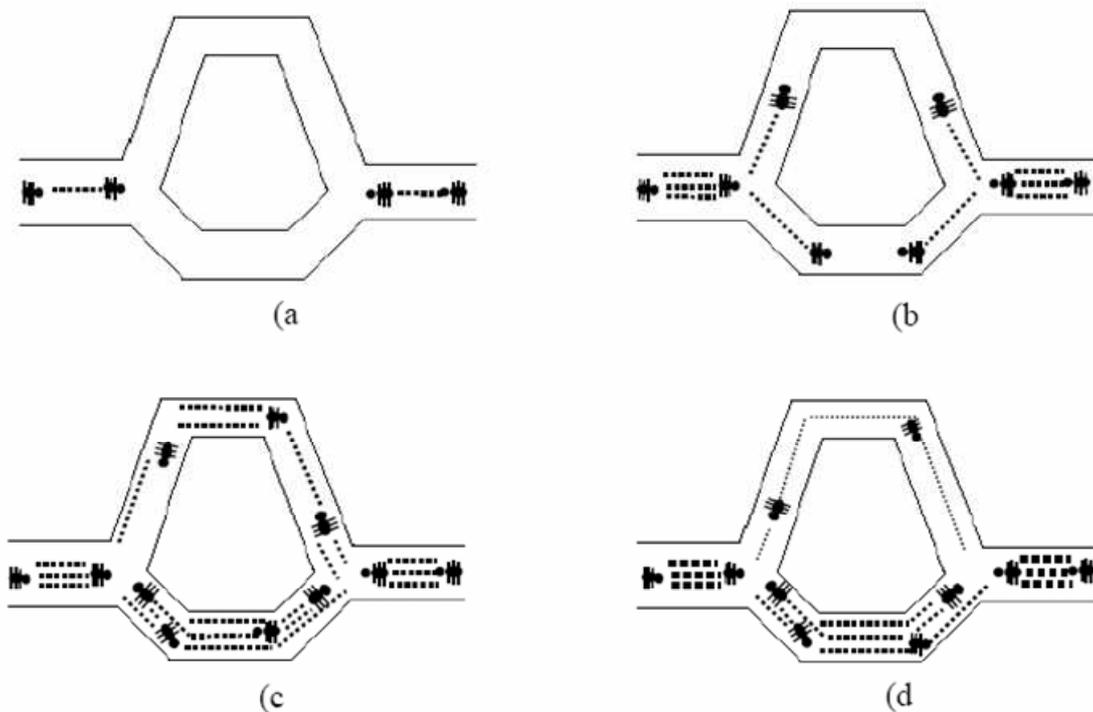


Figura 3.1: Comportamiento de las hormigas reales.

La técnica de las hormigas para establecer el camino más corto ha inspirado este novedoso sistema aplicable a numerosos problemas.

El algoritmo Ant System es un nuevo algoritmo de búsqueda cooperativo inspirado por la conducta de las hormigas reales. La conducta de las colonias de hormigas es imitada por el algoritmo *AS* usando agentes sencillos, llamados hormigas (ants), que se comunican indirectamente por medio de un mecanismo inspirado en el rastro de feromona. Los rastros de feromona artificial, son un tipo de información numérica distribuida que es modificada por las hormigas y refleja su experiencia en la solución de un problema en particular.

Hay tres principales ideas que el algoritmo de la colonia de hormigas ha adoptado de las colonias reales de hormigas:

- Se utiliza comunicación indirecta a través de la feromona.
- Las rutas más cortas tienden a tener una razón más alta de crecimiento del valor de la feromona.
- Las hormigas tienen preferencia probabilística por las rutas con valores altos de feromona.

A las hormigas artificiales se les da capacidades que no tienen las hormigas reales, que ayudan a resolver los problemas. Por ejemplo:

- Cada hormiga es capaz de determinar qué tan lejos está de un estado.
- Poseen información acerca de su ambiente y la utilizan al tomar decisiones. Así, su comportamiento no sólo es adaptativo sino también “avaricioso”.
- Tienen memoria, la cual es necesaria para asegurar que se generen sólo soluciones factibles (por ejemplo, en el TSP, necesitan saber las ciudades que han visitado pues una ciudad no se puede visitar más de una vez).

3.2 El Problema del Vendedor Viajante

El Problema del Vendedor Viajante (TSP = Traveling Salesman Problem) es uno de los problemas de optimización combinatoria más tradicionales y estudiados. Su variante más habitual, el TSP euclídeo y simétrico, consiste en una distribución de N ciudades en un plano bidimensional, para lo cual se define $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ como la distancia euclidiana entre la ciudad i y la ciudad j .

Cada ciudad es alcanzable desde cualquier otra ciudad mediante un camino cuya longitud viene definida por la distancia euclidiana que separa a ambas ciudades. Un vendedor se dedica a recorrer estas ciudades comprando y vendiendo productos. Su interés es el de recorrer todas las ciudades empleando para ello el trayecto total más corto posible.

De modo más concreto, el problema consiste en hallar una ruta que, partiendo de una ciudad determinada, recorra todas las ciudades restantes, volviendo a la ciudad origen y minimizando la distancia total del recorrido.

Las restricciones que se han de tener en cuenta en este problema son las siguientes:

- cada ciudad sólo puede ser visitada una única vez en el recorrido.
- el recorrido debe pasar por todas las ciudades.
- el recorrido debe ser único y completo (no puede haber varios recorridos inconexos).

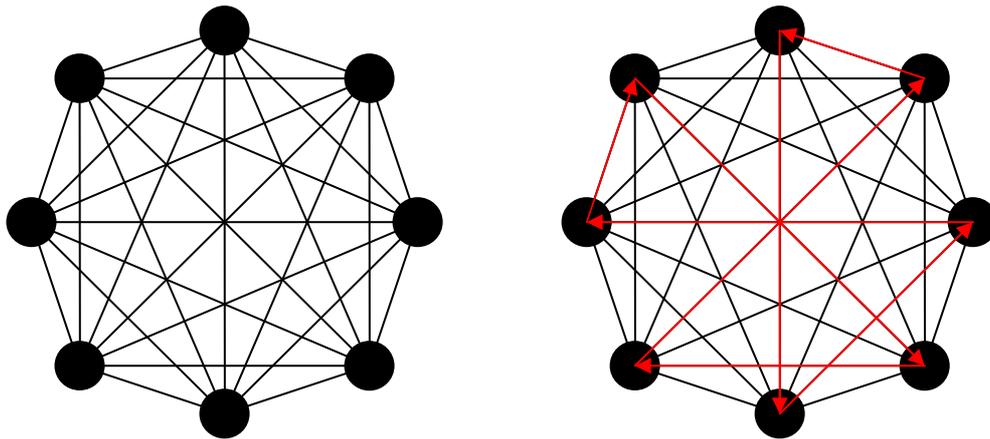


Figura 3.2: Representación gráfica del TSP.

Pueden surgir otras restricciones debidas a la representación elegida. También existen muchas variantes del problema que introducen restricciones de todo tipo. Para el presente trabajo se contemplará únicamente la versión más habitual (euclídeo y simétrico).

Una característica recurrente en estos problemas de optimización combinatoria es el hecho de que son muy fáciles de entender y de enunciar, pero generalmente son difíciles de resolver. Podría pensarse que la solución de un problema de optimización combinatoria se restringe únicamente a buscar de manera exhaustiva el valor máximo o mínimo en un conjunto finito de posibilidades y que usando una computadora veloz, el problema carecería de interés matemático, sin pensar por un momento, en el tamaño de este conjunto, que hace inviable cualquier intento de búsqueda exhaustiva en problemas de tamaño no muy restringidos.

El Problema del Vendedor Viajante ha sido considerado un paradigma desde hace muchísimos años. Científicos de todas partes han ocupado su tiempo en resolver diferentes instancias del problema. En este trabajo se presenta un algoritmo basado en colonia de hormiga para la solución de un problema específico de vendedor viajante, este algoritmo se adapta posteriormente al problema del planeamiento.

3.3 Ant System Aplicado al TSP.

Inspirados en el comportamiento de las hormigas, arriba descrito, Dorigo et al. [1] proponen el algoritmo *Ant System (AS)*, presentado a continuación para dar solución al problema del vendedor viajante. Se considera un conjunto de n ciudades que deben ser visitadas una sola vez con el objeto de encontrar la longitud mínima de recorrido.

Cada hormiga es un simple agente con las siguientes características:

- Elige la ciudad destino calculando una probabilidad que es una función de la distancia entre las ciudades origen y destino y la cantidad de feromona presente en el arco que las conecta.
- Se obliga a cada hormiga a realizar un tour legal, esto es, visitar cada ciudad una sola vez. Viajar a una ciudad ya visitada no está permitido hasta que complete todo el viaje.
- Cuando viaja de la ciudad i a la ciudad j , deposita una cantidad de feromona, en el arco (ij) , marcando el camino recorrido.

Para satisfacer la restricción de que una hormiga visite todas las ciudades una sola vez, se asocia a cada *hormiga* k una estructura de datos o lista, Ω_k , que guarda las ciudades ya visitadas por dicha hormiga. Una vez que todas las ciudades hayan sido recorridas, el trayecto o tour (ciclo) es completado, la lista se vacía y nuevamente la hormiga está libre para iniciar un nuevo tour.

3.3.1 Descripción.

Dado un problema *TSP* de n ciudades y distancias d_{ij} entre cada par de ciudades i y j :

1. Se inicializa la matriz de feromonas con un valor C constante. Las hormigas artificiales se distribuyen inicialmente en las n ciudades de acuerdo a algún criterio (aleatoriamente, por ejemplo).

2. Posteriormente, cada hormiga decide la ciudad a visitar en cada paso de un ciclo que se repite hasta que todas las ciudades son visitadas exactamente una vez por cada hormiga. La decisión de qué ciudad visitar, se toma con base en la siguiente expresión, donde p_{ij} denota la probabilidad de que una ciudad j sea seleccionada para visitarse después de la ciudad i :

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha * [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}]^\alpha * [\eta_{ij}]^\beta} & \text{si } j \notin \Omega \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3.1)$$

Siendo:

$$\eta_{ij} = 1/d_{ij}$$

Donde:

- τ_{ij} : cantidad de feromona entre las ciudades i y j
- α : parámetro para regular la influencia de τ_{ij}
- η_{ij} : visibilidad de la ciudad j desde la ciudad i
- β : parámetro para regular la influencia de η_{ij}
- Ω : conjunto de ciudades que han sido visitadas
- $d_{i;j}$ distancia entre las ciudades i y j

3. Cuando se termina el ciclo (cada hormiga ha concluido su recorrido) se calcula la longitud del recorrido generado por cada hormiga y se actualiza el mejor recorrido encontrado hasta el momento.

4. Finalmente, se actualizan las cantidades de feromona. Esto se hace con la siguiente fórmula:

$$\tau_{ij} = \rho * \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij} \quad (3.2)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3.3)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si la hormiga } k \text{ viajó por el eje } (i, j) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.4)$$

Siendo:

$\rho \in [0, 1]$ coeficiente de persistencia de las feromonas.

$\Delta \tau_{ij}$ es el incremento en la cantidad de feromona en el eje (i, j) .

m es el número de hormigas.

$\Delta \tau_{ij}^k$ es el incremento en la cantidad de feromona en el eje (i, j) realizado por la hormiga k .

Q es un valor constante que representa la cantidad de feromona depositada por una hormiga en cada recorrido.

L_k es la longitud del recorrido de la hormiga k .

En cada recorrido, cada hormiga deja una cantidad de feromona dada por Q/L_k , donde Q es una constante y L_k la longitud de su recorrido. Por lo tanto, en recorridos más cortos se deposita más feromona. En el algoritmo se simula la evaporación de feromona que sucede en la realidad. Las cantidades de feromona se reducen con un factor $(1-\rho)$ antes de que se deposite nueva feromona. Esto se hace para evitar convergencia prematura.

Los pasos anteriores se repiten t veces, donde t es el número de iteraciones.

Capítulo 4

Metodología Propuesta

Para resolver el problema del planeamiento de redes secundarias, este trabajo propone una adaptación del algoritmo original del Ant system presentado en el capítulo 3. El algoritmo propuesto genera configuraciones en cuanto al tipo de conductor y distribución de las cargas, correspondiente a la propuesta de planeamiento, estas configuraciones se valoran por medio de un flujo de carga radial del tipo barrido iterativo para encontrar los voltajes nodales y las corrientes por las líneas para posteriormente evaluar la función objetivo de la configuración propuesta, a partir de los costos fijos y variables correspondientes. Se verifica el cumplimiento de las restricciones de capacidad de potencia en líneas y límites de tensión; en el caso en el que no se cumplan las restricciones, se penaliza la función objetivo introduciendo términos que reflejan el desvío del límite permitido ponderados por un factor de penalización determinado.

Para algunos problemas, el *ant system* como muchas otras metodologías, parte de una solución inicial como dato de entrada a partir de la cual inician el proceso de optimización. En el caso del planeamiento de redes secundarias la metodología propuesta requiere de una configuración base de la red con el fin de calcular la función objetivo inicial (F_0), este valor permite comparar las soluciones encontradas a lo largo del proceso iterativo en búsqueda de un óptimo.

Además de la configuración inicial de la red al algoritmo requiere como datos de entrada algunos parámetros tanto para el flujo de carga como para el *ant system*.

Para el flujo de carga:

- Demanda máxima de cada usuario.
- Tipo de usuario.
- Factor de potencia de cada usuario.
- Datos del transformador.
- Voltaje nominal de la red.
- Restricciones de tensión dadas por las resoluciones CREG.
- Características de los conductores (r , x y corriente admisible).
- Longitud de cada tramo de línea.
- Curva de carga.

Para el ant system:

- Número de hormigas.
- Número de iteraciones.
- α : Peso de la matriz de feromonas.
- β : Peso del valor heurístico.
- ρ : Coeficiente de persistencia de las feromonas.
- τ_0 : Constante para inicializar la matriz de feromonas.

La selección de cada uno de las constantes anteriores influyen directamente en el comportamiento del algoritmo, para cada problema se deben realizar pruebas con varios valores de cada uno con el fin de calibrar los parámetros hasta conseguir el comportamiento deseado.

Como la finalidad del algoritmo es minimizar una función objetivo que hace referencia a los costos (variables y fijos), también es necesario incluir como datos de entrada:

- CkWh: Costo kWh en Miles\$.
- Costos de los diferentes conductores por unidad de longitud.
- Costo de construcción de tramo de línea por unidad de longitud.

A continuación se describen en detalle todos los aspectos de la metodología desarrollada: flujo de carga, esquema de codificación, evolución de la matriz de feromonas, valores heurísticos, entre otras; además de las modificaciones realizadas al Ant System original.

4.1 Flujo de Carga.

En el proceso de optimización a través del *ant system* es posible que surjan muchas soluciones aparentemente óptimas desde el punto de vista de los costos, sin embargo no todas estas soluciones son factibles desde el punto de vista operativo, por ejemplo una solución que posiblemente presente costos sumamente bajos de instalación será seleccionar para todos los tramos de línea el conductor mas económico, sin embargo el hecho de que el conductor sea mas económico trae implícito que será el que cause mas caída de tensión, pero como en el planeamiento de redes de distribución debe incluir condiciones operativas acordes a la regulación, es necesario validar las posibles configuraciones encontradas por medio de un flujo de carga radial.

Ya que en las redes de distribución no se presentan acoples entre las líneas, es posible utilizar un flujo radial monofásico, para tratar en forma independiente cada una de las fases. El flujo de carga es el procedimiento que permite encontrar las corrientes por las ramas y los voltajes en los nodos en un sistema eléctrico. De esta forma se valida que las soluciones encontradas en el proceso de optimización cumplan con los requerimientos en la prestación del servicio estipulados en la regulación como son los niveles mínimos y máximos de tensión; también que los flujos de corriente por los conductores se encuentren dentro de lo niveles admisibles.

Un flujo de carga que tiene en cuenta las características de una red secundaria de distribución es el Barrido Iterativo, el cuál es equivalente al método de Newton-Raphson. Este método presenta buen comportamiento en cuánto a convergencia y no precisa de la utilización de matrices dispersas ni de mucha memoria para almacenar los datos requeridos para la solución del problema.

4.1.1 Barrido iterativo.

En la referencia [8] se describe el método de barrido iterativo. La filosofía del método es tratar de forma separada la primera y segunda ley de Kirchhoff. En su primera parte, denominada Barrido de corrientes, el método efectúa una suma de flujos de corriente desde los nodos más alejados hasta el nodo fuente. En la segunda parte, denominada Barrido de voltajes, con los flujos de corriente encontrados, se hace una actualización de los voltajes en las ramas del sistema, partiendo desde el nodo fuente hasta los nodos más alejados.

4.1.1.1 Barrido de corrientes.

Las líneas se modelan a través de su equivalente serie. De esta forma se pueden calcular los flujos de corriente en las líneas superiores (más cercanas a la subestación) en términos de las líneas inferiores según el ordenamiento nodal (aquellas conectadas a las líneas superiores y más alejadas de la subestación) y de la demanda propia en el nodo correspondiente. Si la línea es subterránea, el efecto capacitivo se modela como inyecciones de corriente, haciendo uso del teorema circuital de sustitución. Suponiendo un valor inicial para los voltajes en cada nodo (usualmente $1\angle 0^\circ$ en p.u.), las inyecciones de corriente se calculan siguiendo la expresión (4.1):

$$i = \left(\frac{P + jQ}{V} \right)^* \quad (4.1)$$

Una vez calculadas las inyecciones de corriente en cada nodo, se determinan los flujos de corriente por las líneas, como se muestra en (4.2):

$$I_k = I_{dk} + \sum_{j \in \Omega_k} I_{jk} \quad (4.2)$$

Donde:

- I_k : corriente por la línea k .
- I_{dk} : corriente demandada en el nodo de recibo de la línea k .
- I_{jk} : corriente de la línea j que esta conectada al nodo de recibo de la línea k .
- Ω_k : conjunto de líneas conectadas al nodo de recibo de la línea k .

Para la aplicación del Barrido Iterativo se requiere que las ramas del sistema se encuentren jerarquizadas por niveles, de tal manera que al calcular la corriente en una rama ya se conozcan las corrientes de las ramas de los niveles inferiores.

4.1.1.2 Barrido de voltajes.

A partir de la tensión en el nodo fuente se calcula la tensión en los demás nodos como aparece en la ecuación (4.3). Para esto se hace uso del ordenamiento nodal, donde la numeración de las ramas (k) es ascendente desde las líneas conectadas a la fuente hasta las líneas más alejadas de la subestación.

$$V_{Krecibo} = V_{Kenvio} - I_k * (R_k + jX_k) \quad (4.3)$$

Donde:

- $V_{Krecibo}$: Tensión en el nodo de recibo de la línea k .
- V_{Kenvio} : Tensión en el nodo de recibo de la línea k .
- I_k : Corriente por la línea k .
- R_k : Resistencia de la línea k .
- X_k : Reactancia de la línea k .

Para conocer el valor de la tensión en un nodo inferior k se requiere conocer la tensión en el nodo superior, la corriente en la rama de alimentación correspondiente y los

parámetros del modelo serie de la línea. La corriente por la línea es un valor conocido en el barrido de corrientes hecho previamente.

4.2 Ant system aplicado al planeamiento de redes secundarias.

El problema del planeamiento de redes secundarias se afrontó desde el punto de vista de balance de cargas entre las fases del sistema y la selección óptima de los conductores a utilizar buscando la mejor configuración posible de la red, que brinde un mínimo costo de inversión y operación, con los mejores resultados operativos. Lo que busca el algoritmo propuesto es que cada hormiga de la colonia decida a que fase del circuito se conectará cada uno de los usuarios y que tipo de conductor utilizar en cada tramo de línea, generando configuraciones aleatorias que tras la aplicación del algoritmo convergen en una solución subóptima que eventualmente podría tratarse de un óptimo global.

Las hormigas toman sus decisiones basadas en una cierta probabilidad calculada para cada una de las opciones, esta probabilidad como se indica en la ecuación (3.1) contiene dos variables: η y τ que representan un valor heurístico propio de cada problema y un valor de feromonas respectivamente. Para el problema la decisión correspondiente al balance de cargas (conexión de cada usuario a una fase) es completamente independiente de la selección de conductores, por lo tanto se utilizan dos matrices de feromonas y dos valores heurísticos diferentes para cada decisión que serán estudiados en detalle mas adelante.

Para aplicar este algoritmo planeamiento de redes secundarias, fue necesario modelar el problema como el tipo de problemas para los que el algoritmo AS fue diseñado y en los que ha logrado buenos resultados. Estos problemas son todos aquellos que pueden modelarse directamente como el problema del vendedor viajero.

4.2.1. Esquema de codificación.

Como se estudio en el capítulo 3 para el problema *TSP* el tour realizado por cada hormiga es almacenado en una lista que posteriormente se utiliza para el cálculo del

recorrido total realizado. Para el problema de planeamiento de redes secundarias se utilizó un esquema de codificación similar, almacenando en un arreglo matricial las posibles soluciones encontradas por las hormigas en cada iteración:

		Usuario #						Tramo de línea #							
		Conectado a fase:						Tipo de conductor:							
		1	...	j-1	j	j+1	...	Nu	1	...	k-1	k	k+1	...	Nt
1		1	...	2	3	1	...	2	#1	...	#1	#2	#3	...	#4
	:			:	:	:		:	:		:	:	:		:
n-1		3	...	2	1	3	...	2	#4	...	#3	#3	#2	...	#1
n		2	...	2	3	1	...	1	#2	...	#2	#2	#3	...	#4
n+1		3	...	3	2	2	...	1	#2	...	#1	#1	#3	...	#2
	:			:	:	:		:	:		:	:	:		:
Nh		1	...	1	2	2	...	3	#1	...	#3	#4	#2	...	#1

Figura 4.1: Esquema de codificación.

En este esquema de codificación se tiene que:

- Para cada hormiga de la colonia representada por $n=1, \dots, Nh$ (Nh : número de hormigas), existe un vector con la ruta (solución) encontrada por cada una.

Donde:

- 1, 2, 3 representan la fase a la que se conecta cada usuario A, B o C respectivamente, para $j=1, \dots, Nu$ (Nu : número de usuarios).
- Las posiciones siguientes $k=1, \dots, Nt$ (Nt : número de tramos) representan el tipo de conductor en cada uno de los tramos de línea de la red.

La red base ingresada en el algoritmo como dato de entrada, incluye a que poste o nodo de la red se debe conectar cada usuario, condición que es variable dado a que hace referencia a la topología de la red y quien no hace parte del proceso de optimización. A

continuación se presenta un ejemplo de red secundaria muy simple con el fin de ilustrar mejor el esquema de codificación y la forma de ingresar la red base.

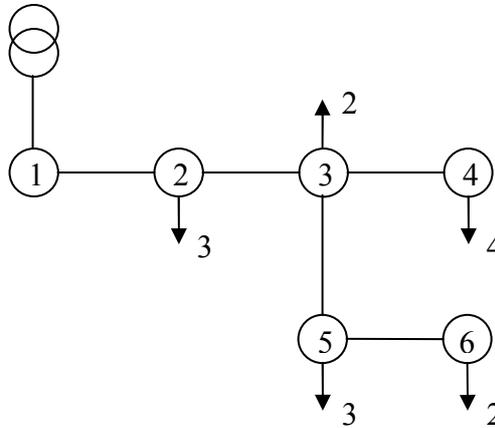


Figura 4.2: Red secundaria de distribución.

En la figura 4.2 se muestra una red secundaria sencilla, que consta de 6 postes o nodos y 14 usuarios conectados a ella, también se indica a que nodo esta conectado cada usuario, por ejemplo los usuarios del 1 al 3 se encuentran conectados al nodo 2, en el nodo 3 están los usuarios del 4 al 5, en el nodo 4 están los usuarios del 6 al 9 y así sucesivamente, de esta forma el algoritmo siempre sabrá a que nodo asociar cada usuario al momento de realizar el flujo de carga, a manera de ejemplo se supone que en la red base la distribución de las cargas y los conductores, se especifican como de entrada, según e muestra en las figuras 4.3 y 4.4:

Envío	Recibo	Longitud (Km.)	Conductor #
1	2	0.03	1
2	3	0.03	1
3	4	0.03	2
3	5	0.03	2
5	6	0.03	3

Figura 4.3: Datos de entrada: topología de la red.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	1	1	1
3	1	1	0
4	1	1	2
5	1	1	1
6	0	1	1

Figura 4.4: Datos de entrada: Distribución de cargas por fase.

Con los datos de entrada anterior el vector que representa la red base y con el cual se calcula la función objetivo inicial (F_0) será:

Usuario #														Tramo de línea #				
Conectado a fase:														Tipo de conductor:				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5
1	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	3	2	3	1	1	2	2	3

Figura 4.5: Ejemplo red base.

4.2.2. Decisión probabilística.

Los algoritmos ACO son procesos iterativos. En cada iteración se "lanza" una colonia de m hormigas y cada una de las hormigas de la colonia construye una solución al problema. Las hormigas construyen las soluciones de manera probabilística, guiándose por un rastro de feromona artificial y por una información calculada a priori de manera heurística. Como se expuso anteriormente el problema del planeamiento se trató con base a dos variables, balance de cargas y selección de conductores, esto quiere decir que hasta cierto punto del camino cada hormiga debe seleccionar a que fase conectar el usuario siguiente para avanzar, posteriormente el paso consiste en la selección del tipo de conductor para cada tramo de la línea. Según lo anterior es necesario utilizar dos matrices que contengan el rastro de feromona artificial y plantear los dos valores heurísticos a utilizar para cada fase del problema.

La ruta de una hormiga o agente será una configuración de la red secundaria. Es decir, cada hormiga recorre una ruta, y al hacerlo construye una red. En el *TSP* las hormigas encuentran la ruta más económica en términos de distancia, aquí lo hacen en términos de los costos involucrados en la función objetivo (2.1).

4.2.2.1. Matriz de feromonas.

Con la aplicación del algoritmo cada una de las hormigas genera configuraciones aleatorias que pueden llevar a soluciones buenas y malas, el algoritmo almacena la calidad de los resultados en matrices, de tal forma que entre mas cerca se encuentre el resultado encontrado por la hormiga k al mejor encontrado por la colonia hasta el momento mayor será el rastro de feromona artificial que esta deje a lo largo del recorrido que haya realizado, aumentando las probabilidades de que en futuros recorridos todas las hormigas sigan los caminos mas cortos (mejores soluciones).

Las matrices de feromonas utilizadas, son las siguientes:

		Usuario #						
		1	...	k-1	k	k+1	...	Nu
Fases	A		
	B		
	C		

Figura 4.6: Matriz de feromonas para balance de fases.

		Tramo de línea #						
		1	...	k-1	k	k+1	...	Nt
conductor	#1		
	#2		
	:	:		:	:	:		:
	#n		

Figura 4.7: Matriz de feromonas para selección del conductor.

4.2.2.2. Valor heurístico.

La ecuación (3.1) representa la regla probabilística para el caso del algoritmo, donde η_{ij} es la información heurística para la que, en el caso del TSP, se utiliza la inversa de la distancia existente entre las ciudades i y j ; con el fin de que las hormigas tengan cierta preferencia por las ciudades más cercanas.

Para determinar el valor heurístico en el balance de fases se utilizarán las corrientes inyectadas al nodo slack de la red, el desbalance en las corrientes de fase totales del sistema está directamente relacionado con el desbalance de cargas, de modo que entre más carga tenga una fase mayor será su corriente; teniendo en cuenta lo anterior, el valor heurístico será el inverso de las corrientes de fase, de este modo entre menos carga tenga una fase mayor será la probabilidad de que los usuarios se conecten a esta.

En cuanto a la selección de los conductores se utiliza como información heurística el inverso del costo por unidad de longitud de cada tipo de conductor, de modo que los conductores más económicos tengan mayor probabilidad.

4.2.3. Modificación al algoritmo original.

Con el fin de evitar caer en óptimos locales que se presentan cuando la matriz de feromonas se homogeniza en muy pocas iteraciones, se utiliza una metodología que consiste en reinicializar la matriz de feromonas luego de 100 iteraciones sin encontrar una nueva solución incómbete, con el propósito de encontrar nuevas rutas que lleven a mejores soluciones.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada para el planeamiento de redes secundarias de distribución, para 4 redes secundarias de prueba; 2 redes existentes en la ciudad de Pereira sobre las cuales se realizará una comparación entre el método de planeamiento utilizado actualmente por la empresa de energía de Pereira y el propuesto en este trabajo, las otras se consideran redes en construcción, es decir se realizará el planeamiento total de la red considerando inexistente cualquier tramo de línea, de este modo se busca analizar el comportamiento del algoritmo ante diferentes casos de prueba.

Fueron realizadas simulaciones considerando la posibilidad de cambio de conductores en los tramos de línea y cambio de cargas entre fase, tomando como referencia una configuración inicial propuesta, para encontrar la mejor configuración para las tres redes desde el punto de vista económico y con el mejor perfil de tensión posible. Los resultados presentados a continuación son la mejor solución encontrada tras las simulaciones.

En los casos de prueba se usaron los parámetros para Colonia de hormigas mostrados en la tabla 5.1.

Parámetros Colonia de Hormigas	
# de hormigas	25
alfa	1
beta	1

ρ	0.9
τ_0	1
Q	1
# de iteraciones	1000

Tabla 5.1: Parámetros colonia de hormigas.

Los costos para las variables del problema se especifican en la tabla 5.2

Costos fijos y variables		
Tipo de conductor		Costo
Cuádruplex Autosoportados		(Miles\$/Km)
1	3*4/0+4/0	46000
2	3*3/0+3/0	36672
3	3*2/0+2/0	33866
4	3*1/0+1/0	27985
Construcción de línea		
Costo(Miles\$/km)		250000
kWh		
Costo(Miles\$)		0.1

Tabla 5.2: Costos fijos y variables.

El valor nominal de la red se asume de 110 voltios, los límites de tensión son 1.05 como valor máximo y 0.95 como valor mínimo, en términos de la tensión nominal del sistema. El horizonte de planeamiento es a 1 año.

Las curvas de cargas utilizadas para cada tipo de usuario están discretizadas en los 24 periodos del día, a cada uno se le asigna un porcentaje de su demanda máxima como se muestra en la tabla 5.3.

Curvas de carga																									
Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Residencial	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	0.9	0.8	0.6	0.5	0.3	
Comercial	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.8	1	1	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	0.7	0.5	0.3	0.3	0.3

Tabla 5.3: Curvas de carga.

La demanda máxima se asume:

Usuarios residenciales: 0.730 kVA

Usuarios comerciales: 2.4 kVA

5.1 Circuito 1.

Como primer circuito de prueba se utilizó la red secundaria alimentada por el transformador #546 de EEPP, la topología de la red se presenta en la figura 5.1; la red alimenta 160 usuarios todos residenciales, se realizan dos tipos de simulaciones: en la primera se realiza el balance de fases con una sola opción de conductor (3*2/0+2/0) el cual es utilizado comúnmente por EEPP en el diseño de todas las redes secundarias, luego se aplica el algoritmo con las 4 opciones de conductores nombrados anteriormente, se comparan los resultados para los dos tipos de planeamiento.

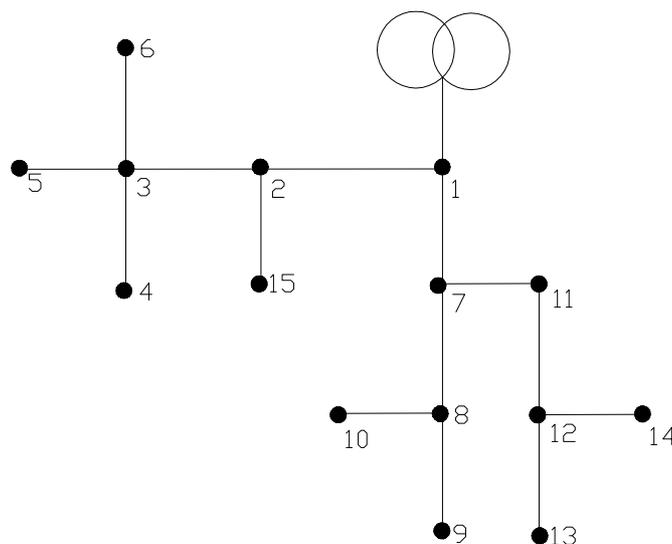


Figura 5.1: Topología red de prueba #1.

Se ejecutó el algoritmo 20 veces con solo una opción para la selección del conductor a utilizar en cada tramo, los resultados obtenidos para la mejor solución están ilustrados en las tablas 5.4 y 5.5 el costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.6:

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.0	110.0	110.0
2	108.0	108.2	108.1
3	107.4	107.4	107.4
4	106.9	106.8	106.9
5	107.3	107.3	107.2
6	107.3	107.4	107.3
7	107.0	107.0	106.9
8	106.2	106.2	106.1
9	106.0	105.9	105.9
10	106.1	106.1	106.0
11	105.4	105.4	105.5
12	104.8	104.8	104.9
13	104.2	104.3	104.4
14	104.6	104.5	104.6
15	107.7	108.0	107.9

Tabla 5.4: Valores de tensión en voltios en los nodos de la red de prueba #1.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	6	3	5
3	1	1	0
4	4	5	4
5	2	3	4
6	1	1	1
7	17	17	19
8	1	1	1
9	4	5	4
10	3	2	3
11	0	0	0
12	3	2	1
13	5	4	4
14	2	4	4
15	5	4	4

Tabla 5.5: distribución de cargas (# de usuarios) en las fases red de prueba #1.

Costo Total	
Millones \$	763.3

Tabla 5.6: Costo total red de prueba #1.

Se ejecutó el algoritmo 20 veces utilizando los 4 conductores que se indican en la tabla 5.2 como posibilidades, los resultados obtenidos para la mejor solución están ilustrados en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 el costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.10:

Tramo de línea	Conductor Seleccionado
1-2	1
2-3	1
3-4	2
3-5	1
3-6	3
1-7	1
7-8	2
8-9	2
8-10	4
7-11	1
11-12	1
12-13	2
12-14	1
2-15	3

Tabla 5.7: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #1.

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.0	110.0	110.0
2	108.7	108.7	108.7
3	108.3	108.2	108.2
4	108.0	107.7	107.7
5	108.1	108.1	108.2
6	108.2	108.1	108.2
7	107.9	108.0	108.0
8	107.3	107.3	107.3
9	107.1	107.1	107.1
10	107.1	107.2	107.1
11	106.9	106.9	107.0
12	106.4	106.5	106.6
13	105.9	106.1	106.2

14	106.3	106.3	106.4
15	108.5	108.4	108.5

Tabla 5.8: Valores de tensión en voltios en los nodos de la red de prueba #1.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	6	3	5
3	0	1	1
4	3	5	5
5	4	3	2
6	1	1	1
7	18	17	18
8	1	1	1
9	4	5	4
10	3	2	3
11	0	0	0
12	3	3	0
13	5	4	4
14	2	3	5
15	4	5	4

Tabla 5.9: distribución de cargas (# de usuarios) en las fases red de prueba #1.

Costo Total	
Millones \$	503.88

Tabla 5.10: Costo total red de prueba #1.

5.2 Circuito 2.

Se realizó el mismo procedimiento utilizado en el circuito de prueba 1, en este caso la red de prueba utilizada es la red secundaria alimentada por el transformador #248 de EEPP, la topología de la red se presenta en la figura 5.2; la red alimenta 162 usuarios todos residenciales, se realizan dos tipos de simulaciones: en la primera se realiza el balance de fases con una sola opción de conductor (3*2/0+2/0) el cual es utilizado comúnmente por EEPP en el diseño de todas las redes secundarias, luego se aplica el algoritmo con las 4 opciones de conductores nombrados anteriormente, se comparan los resultados para los dos tipos de planeamiento.

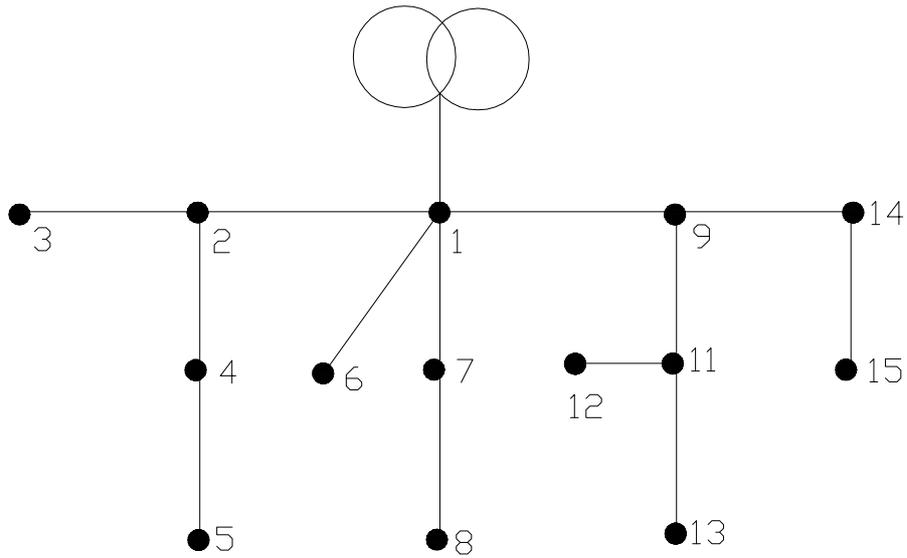


Figura 5.2: Topología red de prueba #2.

Se ejecutó el algoritmo 20 veces con solo una opción para la selección del conductor a utilizar en cada tramo, los resultados obtenidos para la mejor solución están ilustrados en las tablas 5.11 y 5.12 el costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.13:

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.0	110.0	110.0
2	109.4	109.4	109.5
3	109.1	109.1	109.3
4	109.1	109.2	109.3
5	108.9	109.0	109.1
6	109.0	109.1	109.2
7	109.3	109.4	109.3
8	107.9	108.1	107.9
9	109.1	109.1	109.1
10	108.0	107.9	108.0
11	108.6	108.6	108.6
12	107.9	108.0	107.9
13	108.5	108.5	108.6
14	108.3	108.4	108.3
15	106.9	107.1	106.9

Tabla 5.11: Valores de tensión en voltios en los nodos de la red de prueba #2.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	0	0	0
3	5	6	4
4	1	0	0
5	3	3	3
6	9	8	7
7	0	0	0
8	10	9	10
9	0	0	0
10	9	10	9
11	0	1	1
12	6	5	6
13	1	1	0
14	0	0	0
15	12	11	12

Tabla 5.12: distribución de cargas (# de usuarios) en las fases red de prueba #2.

Costo Total	
Millones \$	433.62

Tabla 5.13: Costo total red de prueba #2.

Se ejecutó el algoritmo 20 veces utilizando los 4 conductores que se indican en la tabla 5.2 como posibilidades, los resultados obtenidos para la mejor solución están ilustrados en las tablas 5.14, 5.15 y 5.16 el costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.17:

Tramo de línea	Conductor Seleccionado
1-2	3
2-3	4
2-4	2
4-5	3
1-6	1
1-7	1
7-8	1
1-9	1
9-10	1
9-11	2
11-12	2
11-13	2

9-14	1
14-15	1

Tabla 5.14: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #2.

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.0	110.0	110.0
2	109.4	109.5	109.5
3	109.1	109.1	109.1
4	109.1	109.3	109.3
5	108.9	109.1	109.1
6	109.4	109.4	109.4
7	109.5	109.6	109.5
8	108.6	108.7	108.6
9	109.4	109.4	109.4
10	108.6	108.6	108.6
11	109.0	109.0	109.0
12	108.4	108.4	108.5
13	109.0	108.9	108.9
14	108.9	108.9	108.9
15	108.0	107.9	107.9

Tabla 5.15: Valores de tensión en voltios en los nodos de la red de prueba #2.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	0	0	0
3	5	5	5
4	1	0	0
5	3	3	3
6	8	8	8
7	0	0	0
8	10	9	10
9	0	0	0
10	10	9	9
11	1	0	1
12	6	6	5
13	0	1	1
14	0	0	0
15	11	12	12

Tabla 5.16: distribución de cargas (# de usuarios) en las fases red de prueba #2.

Costo Total	
Millones \$	503.88

Tabla 5.17: Costo total red de prueba #2.

Con base en los resultados anteriores se puede concluir que la metodología propuesta mostró ser mucho más eficiente que el método utilizado por EEPP, presentando costos más bajos y mejores perfiles de tensión.

5.3 Circuito 3.

El tercer circuito de prueba consta de 13 nodos, la topología de la red se presenta en la figura 5.3; con el fin de observar mejor el comportamiento del algoritmo, la red base se diseña con el peor escenario posible: todos los tramos de línea utilizan el conductor más costoso, además inicialmente todas las cargas de la red se conectan a una sola fase. La configuración inicial de la red y la distribución de cargas en las fases se exponen en el apéndice A. Los resultados de la nueva configuración hallada como solución para este sistema luego de ejecutar el algoritmo 20 veces están ilustrados en las tablas 5.18, 5.19 y 5.20. El costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.21.

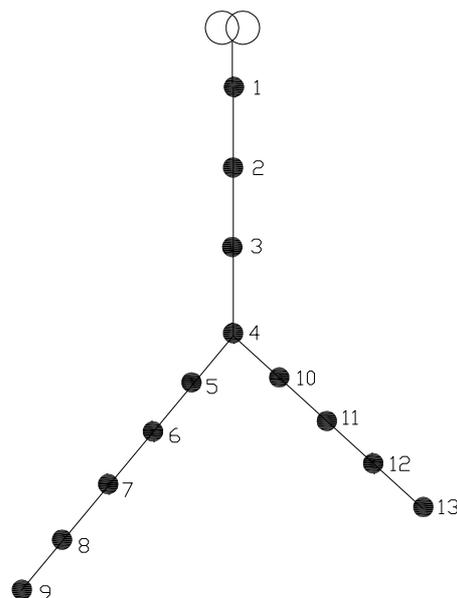


Figura 5.3: Topología red de prueba #3.

Tramo de línea	Conductor Seleccionado
1-2	1
2-3	1
3-4	1
4-5	1
5-6	2
6-7	2
7-8	3
8-9	3
4-10	1
10-11	1
11-12	2
12-13	4

Tabla 5.18: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #3.

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.00	110.00	110.00
2	109.22	109.31	109.14
3	108.53	108.67	108.32
4	107.89	108.03	107.55
5	107.55	107.69	107.17
6	107.25	107.33	106.83
7	106.95	106.97	106.55
8	106.70	106.72	106.36
9	106.56	106.49	106.29
10	107.69	107.73	107.32
11	107.33	107.29	106.98
12	107.18	107.04	106.79
13	106.99	107.04	106.73

Tabla 5.19: Valores de tensión en voltios en los nodos red de prueba #3.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	2R	1R	1R
3	1R	0	1R
4	2R	0	1C
5	2R	1R	2R
6	0	0	1R
7	0	1R	1R
8	1R	1R+1C	3R
9	1R+1C	1R	1R
10	0	1R	1R
11	1R	0	0

12	0	3R	2R+1C
13	1R	0	1C
R = Usuario Residencial C=Usuario Comercial			

Tabla 5.20: distribución de cargas en las fases red de prueba #3.

Costo Total	
Millones \$	247.9

Tabla 5.21: Costo total red de prueba #3.

5.4 Circuito 4.

El tercer circuito de prueba consta de 25 nodos, la topología de la red se presenta en la figura 5.4; con el fin de observar mejor el comportamiento del algoritmo, la red base se diseña con el peor escenario posible: todos los tramos de línea utilizan el conductor más costoso, además inicialmente todas las cargas de la red se conectan a una sola fase. La configuración inicial de la red, los conductores utilizados y la distribución de cargas en las fases se exponen en el apéndice A. Los resultados de la nueva configuración hallada como solución para este sistema luego de ejecutar el algoritmo 20 veces están ilustrados en las tablas 5.22, 5.23 y 5.24. El costo total para esta solución se presenta en la tabla 5.25.

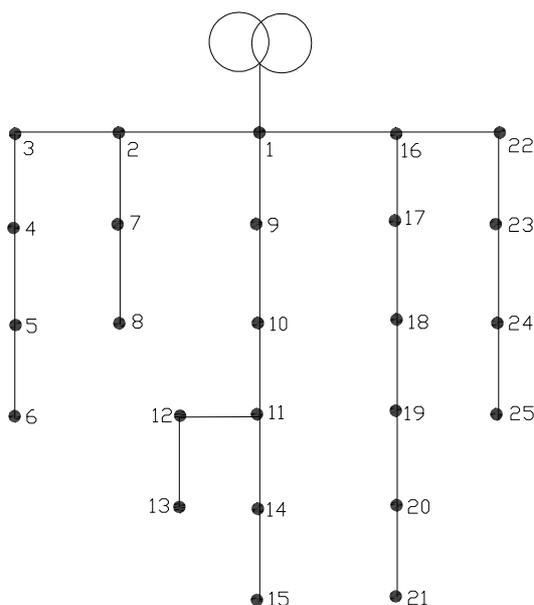


Figura 5.4: Topología red de prueba #4.

Tramo de línea	Conductor Seleccionado
1-2	1
2-3	1
3-4	3
4-5	4
5-6	6
2-7	4
7-8	5
1-9	2
9-10	2
10-11	3
11-12	3
12-13	6
11-14	3
14-15	6
1-16	2
16-17	4
17-18	5
18-19	5
19-20	6
20-21	6
16-22	2
22-23	2
23-24	4
24-25	5

Tabla 5.22: Tipo de conductor seleccionado red de prueba #4.

Nodo\Fase	A	B	C
1	110.00	110.00	110.00
2	109.61	109.69	109.78
3	109.41	109.46	109.50
4	108.99	109.19	109.01
5	108.69	108.97	108.77
6	108.33	108.61	108.77
7	108.88	109.40	109.78
8	108.88	109.20	109.78
9	109.33	109.12	109.42
10	108.85	108.41	108.83
11	108.33	107.97	108.27
12	108.08	107.79	107.96
13	108.08	107.40	107.12
14	108.15	107.73	108.05
15	107.85	107.43	107.87
16	109.29	109.62	109.51
17	108.15	109.09	109.07

18	106.46	108.38	108.36
19	105.91	108.22	108.16
20	105.49	108.11	108.04
21	104.63	108.11	107.66
22	108.93	109.23	108.97
23	108.71	108.99	108.69
24	108.63	108.86	108.53
25	108.63	108.86	108.15

Tabla 5.23: Valores de tensión en voltios en los nodos red de prueba #4.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	3R	1C	0
3	0	1C	2R
4	1R	0	3R
5	1R	1R+1C	1R+1C
6	2R	2R	0
7	1R+2C	1R	0
8	0	2R	0
9	1C	3R	0
10	0	1C+2R	1R
11	1R	0	0
12	1R+1C	1R	1R
13	0	2R	1R+1C
14	0	1R	2R
15	1R	1R	2C
16	2R	0	2R
17	1R	1R	0
18	1R	2R	1R
19	1C	1R	2R
20	3R	2R	0
21	1R+1C	0	2R
22	0	0	1R
23	2R	1R	1R
24	1R+1C	1R	1R
25	0	0	3R

R = Usuario Residencial C=Usuario Comercial

Tabla 5.24: distribución de cargas en las fases red de prueba #4.

Costo Total	
Millones \$	420.46

Tabla 5.25: Costo total red de prueba #4.

5.3 Comportamiento del Algoritmo.

Debido a la naturaleza aleatoria del método cada simulación realizada presentara resultados diferentes no solo en la respuesta final, también en la configuración que representa la solución y el más interesante la evolución de la matriz de feromonas que en últimas es la que marca el camino con mayor probabilidad para ser recorrido por las hormigas. A continuación se presentan dos casos completamente diferentes que se presentaron en la ejecución del algoritmo.

En las figuras siguientes los puntos azules representan la mejor solución encontrada en cada iteración mientras que los puntos rojos muestran la solución incómbete.

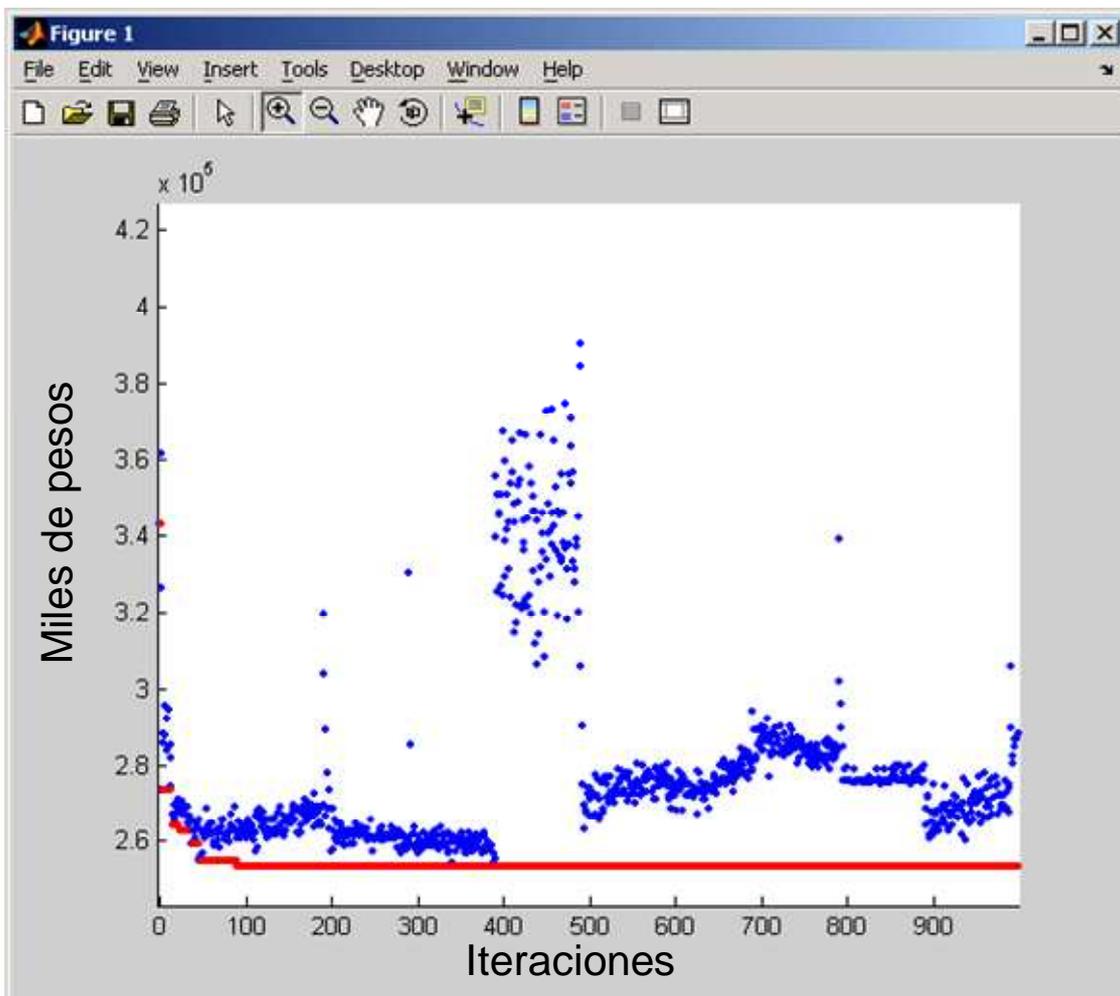


Figura 5.5: Comportamiento del algoritmo.

La figura 5.5 muestra el comportamiento del algoritmo donde se puede observar que el método converge rápidamente (antes de la iteración #100). A pesar de implementar la reinicialización de las matrices de feromonas, el algoritmo no encuentra ninguna solución mejor durante las más de 900 iteraciones restantes.

Sin embargo el comportamiento no siempre es el mismo en la figura 5.6 se muestra una convergencia mas lenta y mucho mas escalonada, donde la solución incómbete muy cercana a la encontrada en el primer caso solo se encuentra después de 700 iteraciones.

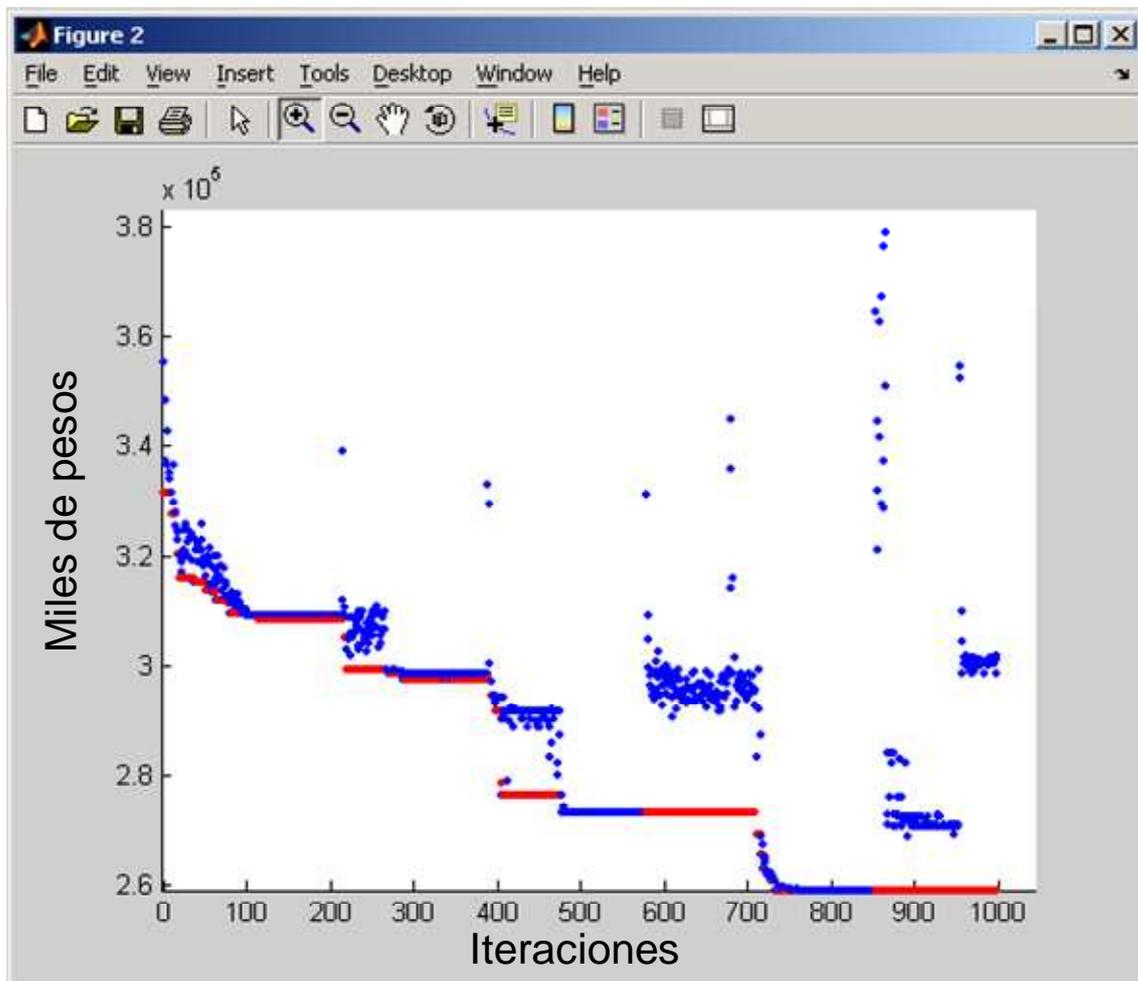


Figura 5.6: Comportamiento del algoritmo.

5.4 Análisis de confiabilidad del Algoritmo.

Con el objetivo de evaluar la confiabilidad de la metodología propuesta, se ejecutó el algoritmo 100 veces para el sistema de prueba 1. La figura 5.7 muestra un histograma de los resultados, donde se puede apreciar que la totalidad de los resultados se encuentran a menos del 0.5 % de la solución incúmbete, lo que permite concluir que cada vez que se ejecute el método la solución encontrada estará muy cerca de la óptima.

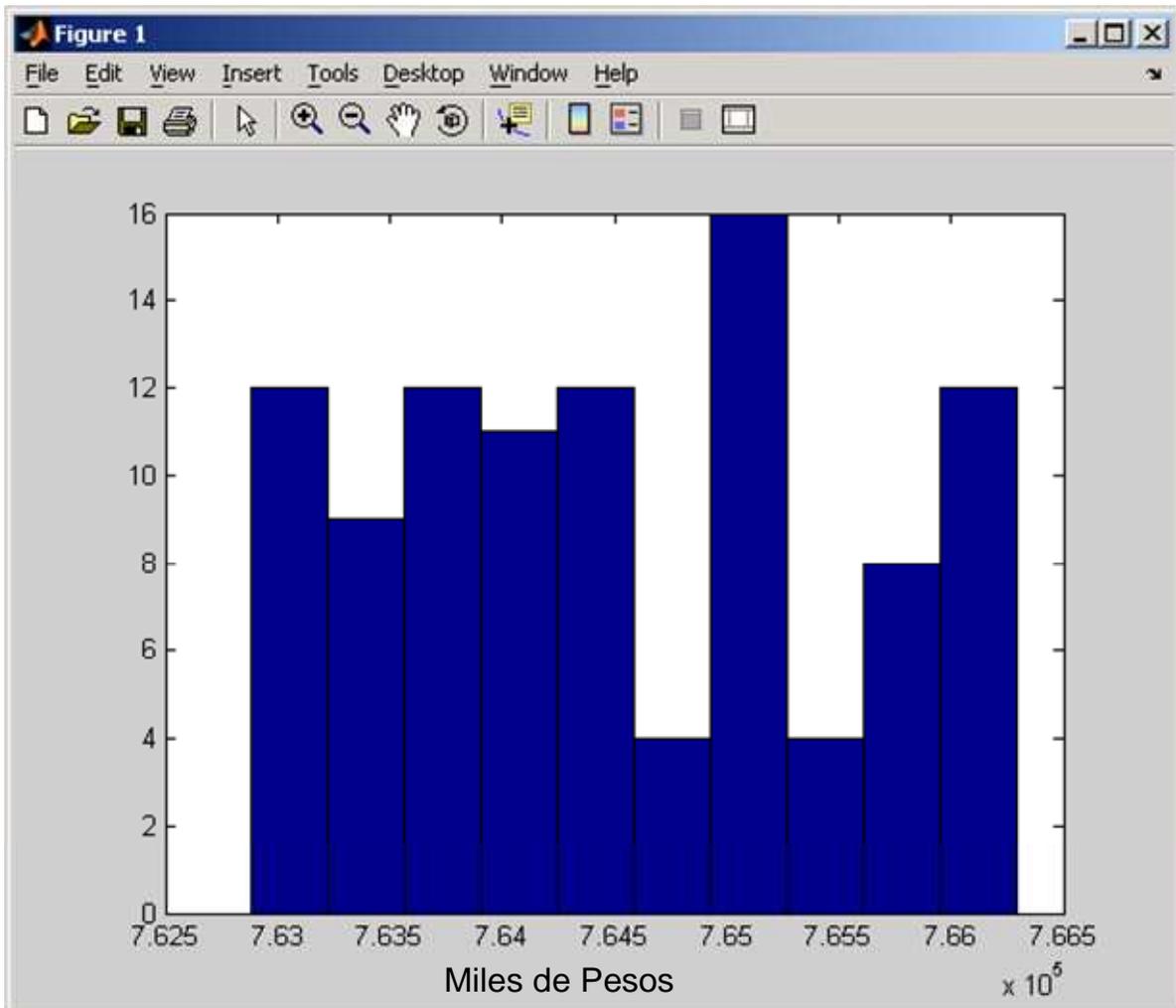


Figura 5.7: Histograma de resultados.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

El presente trabajo desarrolló una metodología para dar solución al problema de planeamiento redes secundarias de distribución, planteando como función objetivo los costos fijos y variables implicados en el planeamiento real de sistemas de distribución. Se utilizaron como factores a utilizar en el planeamiento, la selección de los conductores de las líneas y la distribución el balance de cargas entre las fases del sistema. Las pérdidas de energía diaria para cada tipo de usuario fueron calculadas con base a curvas de carga consiguiendo resultados más cercanos a la realidad.

La metodología de optimización basada en colonia de hormigas, mostró ser una excelente herramienta cuando se trata de afrontar problemas de formulación combinatorial, donde el gran número de posibles alternativas de solución requieren del uso de algoritmos especializados. Presentando un comportamiento efectivo en la solución del problema del planeamiento de sistemas de distribución secundarias.

La técnica desarrollada puede ser utilizada para realizar el planeamiento de redes secundarias de distribución, obteniendo una solución final con un costo mínimo de inversión y operación, cumpliendo con las condiciones de calidad.

Para la evaluación de cada configuración resultante se utilizó un flujo de carga radial de tipo Barrido Iterativo que mostró ser una herramienta apropiada y eficiente para facilitar la verificación del cumplimiento de las restricciones operativas.

La metodología propuesta presenta grandes ventajas frente a los métodos clásicos utilizados por las empresas electricistas para el planeamiento de redes secundarias.

6.1 Futuros trabajos de investigación.

- Como futuros trabajos se puede tratar el problema del planeamiento de redes secundarias de distribución, donde se tenga una interacción paralela entre varias redes secundarias con el fin de analizar el recurso de traslado de carga como una opción de planeamiento, lo cuál llevaría a mejores resultados.
- Integrar la herramienta de planeamiento de de redes secundarias con la ubicación de transformadores y el planeamiento de los alimentadores primarios.
- Incluir la posibilidad de que las cargas conectadas a la red sean de características bifásicas o trifásicas, con el fin de construir metodologías que cada vez estén más cerca de los sistemas reales.

Bibliografía

- [1] Dorigo M., Maniezzo V. y Colomi A., “The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents”, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, Vol 26, No. 1, 1996.
- [2] Cossi A. M., “Planejamento de circuitos secundários de distribuição usando algoritmo evolutivo especializado”, Tesis de Maestría, Universidade Estadual Paulista, 2003.
- [3] Díaz-Dorado, E. y Míguez E., “Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of médium voltage”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17 No. 3, 2002.
- [4] Franco J. F., “Planeamiento de sistemas de distribución usando búsqueda tabú”. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [5] Garcés, A. “Reconfiguración de alimentadores primarios usando una metodología combinatorial bajo un modelamiento trifásico”. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [6] Holland, J. H. “Algoritmos genéticos”, 1992.
- [7] Glover, F., “Tabu Search Fundamentals and Uses”, University of Colorado, Boulder, Colorado, April 1995.
- [8] Grupo de investigación en planeamiento eléctrico de la Universidad Tecnológica de Pereira. “Reducción De Pérdidas Por Etapas En Sistemas De Distribución”, 2006.

- [9] Freeman J. A. y Skapura D. M., *Redes neuronales: Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*, Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. y Ediciones Díaz de Santos S.A., Wilmington, Delaware, Estados Unidos, 1993.
- [10] Dorigo M., Maniezzo V. y Colomi A., “An Investigation of some properties of an Ant algorithm”. *Proceedings of the Parallel Problem solving from Nature Conference (PPSN 92)*, Bruselas – Bélgica, 1992.
- [11] Dorigo M., “Ant Colony System”, <http://iridia.ulb.ac.be/dorigo/ACO/ACO.html>. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium. 1998.
- [12] Thompson G. L., Wall D. L., “A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. PAS-100, n. 5, 1981.
- [13] Sanhueza R. E., “Planificación de la expansión de un sistema de distribución vía algoritmo de descomposición de Benders”, *Tesis de Maestría*, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1994.
- [14] TSAI-HSIANG CHEN E JENG-TYAN CHERNG. Optimal Phase Arrangement of Distribution Transformers Connected to a Primary Feeder for System Unbalance Improvement and Loss Reducton Using a Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.15, n. 3, p.994-1000, 2000.
- [15] JINXIANG ZHU. Phase Balancing using Simulated Annealing, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 4, 1999.
- [16] BAZAN, F. A. et al. Planejamento de Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando um Algoritmo de Busca Tabu, *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal-RN, p. 586-592, 2002.

Apéndice

A. Sistemas de prueba

Este apéndice presenta los datos de los sistemas de prueba que fueron utilizados para la implementación del método desarrollado para la solución del problema de planeamiento de redes secundaria. La tabla A1 indica los valores de impedancia de los tipos de conductor utilizados. Las tablas A2 y A5 muestran la configuración inicial de las redes utilizadas. Las tablas A6 y A6 muestran la distribución de las cargas en cada nodo para la red base utilizada en cada circuito.

# Conductor	# Calibre	R(Ω /km)	X(Ω /km)	CF [Miles\$/km]	Imax(Amp)
1	3*4/0+4/0	0.2094	0.0966	46000	230
2	3*3/0+3/0	0.2615	0.0966	36672	200
3	3*2/0+2/0	0.3266	0.0966	33866	175
4	3*1/0+1/0	0.4080	0.0966	27985	150

Tabla A1: Conductores utilizados circuito de prueba 1.

A.1 Circuito 1.

Envío	Recibo	Longitud (Km)	Conductor #
1	2	0.046	3
2	3	0.036	3
3	4	0.052	3
3	5	0.021	3
3	6	0.025	3
1	7	0.037	3
7	8	0.042	3

8	9	0.028	3
8	10	0.025	3
7	11	0.066	3
11	12	0.029	3
12	13	0.049	3
12	14	0.031	3
2	15	0.029	3

Tabla A.2: Red base circuito de prueba 1.

Nodo\Fase	A	B	C
1	14	0	0
2	2	0	0
3	13	0	0
4	9	0	0
5	3	0	0
6	53	0	0
7	3	0	0
8	13	0	0
9	8	0	0
10	0	0	0
11	6	0	0
12	13	0	0
13	10	0	0
14	13	0	0
15	14	0	0

Tabla A.3: Distribución de cargas red base circuito de prueba 1.

A.2 Circuito 2.

Envío	Recibo	Longitud (Km)	Conductor #
1	2	0.029	3
2	3	0.025	3
2	4	0.034	3
4	5	0.034	3
1	6	0.049	3
1	7	0.032	3
7	8	0.059	3
1	9	0.014	3
9	10	0.053	3
9	11	0.032	3
11	12	0.051	3
11	13	0.035	3

9	14	0.028	3
14	15	0.053	3

Tabla A.4: Red base circuito de prueba 2.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	0	0	0
3	15	0	0
4	1	0	0
5	9	0	0
6	24	0	0
7	0	0	0
8	29	0	0
9	0	0	0
10	28	0	0
11	2	0	0
12	17	0	0
13	2	0	0
14	0	0	0
15	35	0	0

Tabla A.5: Distribución de cargas red base circuito de prueba 2.

A.3 Circuito 3.

Envío	Recibo	Longitud (Km)	Conductor #
1	2	0.03	1
2	3	0.03	1
3	4	0.03	1
4	5	0.03	1
5	6	0.03	1
6	7	0.03	1
7	8	0.03	1
8	9	0.03	1
4	10	0.03	1
10	11	0.03	1
11	12	0.03	1
12	13	0.03	1

Tabla A.6: Red base circuito de prueba 3.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	4R	0	0
3	4R	0	0
4	2R+1C	0	0
5	5R	0	0
6	1R	0	0
7	2R	0	0
8	5R+1C	0	0
9	3R+1C	0	0
10	2R	0	0
11	1R	0	0
12	5R+1C	0	0
13	1R+1C	0	0
R = Usuario Residencial C=Usuario Comercial			

Tabla A.7: Distribución de cargas red base circuito de prueba 3.

A.4 Circuito 4.

Envío	Recibo	Longitud (Km)	Conductor #
1	2	0.015	1
2	3	0.020	1
3	4	0.030	1
4	5	0.030	1
5	6	0.028	1
2	7	0.035	1
7	8	0.024	1
1	9	0.030	1
9	10	0.025	1
10	11	0.032	1
11	12	0.038	1
12	13	0.030	1
11	14	0.030	1
14	15	0.014	1
1	16	0.020	1
16	17	0.032	1
17	18	0.034	1
18	19	0.027	1
19	20	0.030	1
20	21	0.030	1
16	22	0.033	1
22	23	0.030	1
23	24	0.026	1

24	25	0.030	1
----	----	-------	---

Tabla A.8: Red base circuito de prueba 4.

Nodo\Fase	A	B	C
1	0	0	0
2	3R+1C	0	0
3	2+1C	0	0
4	4R	0	0
5	3R+2C	0	0
6	4R	0	0
7	2R+2C	0	0
8	2	0	0
9	3R+1C	0	0
10	3R+1C	0	0
11	1R	0	0
12	3R+1C	0	0
13	3R+1C	0	0
14	3R	0	0
15	2R+2C	0	0
16	4R	0	0
17	2R	0	0
18	4R	0	0
19	3R+1C	0	0
20	4R	0	0
21	3R+1C	0	0
22	1R	0	0
23	4R	0	0
24	3R+1C	0	0
25	3R	0	0

Tabla A.9: Distribución de cargas red base circuito de prueba 4.