



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“BÚSQUEDA TABÚ APLICADA AL PROBLEMA
DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRICA

PRESENTA
ING. ROBERTO CONTRERAS BOLAÑOS

ASESOR
DR. J. JESÚS RICO MELGOZA

MORELIA, MICHOACÁN

JULIO DE 2005



Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por la oportunidad de vivir y servir, de ser y existir.

A mi familia, fuente de valores, de apoyo y sobre todo de amor. A mi Mamá mi Papá y mis hermanos... a todos y cada uno de ustedes mil gracias, porque sin ustedes esto no habría sido posible.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que ha sido mi segunda casa durante los últimos dos años.

Gracias a los profesores del Posgrado de Ingeniería Eléctrica, que con su experiencia y apoyo lograron transmitirnos sus invaluable conocimientos. En particular al Dr. J. Jesús Rico por aceptar asesorarme en este trabajo.

Muchas gracias al CONACYT por apoyar la ciencia y la tecnología en México y considerarme como becario para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco a mis compañeros y amigos del Posgrado de Ingeniería Eléctrica, personas con alta calidad humana, que directa e indirectamente han contribuido a mi formación no solo académica, sino personal.

A Silvia que ha estado presente en los momentos más oportunos e inoportunos mostrándome su apoyo, cariño y comprensión... muchas gracias.

A mis amigos que siguen presentes a pesar del tiempo y la distancia.

Resumen

La operación y planeación de redes eléctricas, con frecuencia plantean la necesidad de resolver problemas de optimización combinatoria. Este tipo de problemas incluyen: trazado óptimo de redes, reconfiguración de circuitos de distribución, localización óptima de capacitores, entre otros.

La manera más simple de resolver este tipo de problemas es empleando la estrategia de la “fuerza bruta” (búsqueda exhaustiva), es decir, todas las combinaciones posibles son analizadas y evaluadas, y de entre todas ellas se elige la mejor. Sin embargo, el tiempo computacional empleado es muy grande y en ocasiones prohibitivo, incluso en problemas con pocas restricciones y pocas variables de decisión.

En la actualidad existen una gran variedad de técnicas heurísticas que intentan encontrar de manera eficiente y en tiempos computacionales razonables la solución a problemas de optimización combinatoria. Algunas de ellas son: algoritmos genéticos, redes neuronales, recocido simulado, búsqueda tabú, etc.

En esta tesis se presenta la técnica de la búsqueda tabú, la cual es aplicada a problemas de optimización combinatoria en los que no es posible emplear técnicas convencionales basadas en gradiente. Se aplica la búsqueda tabú a los problemas del árbol de expansión mínima y la localización óptima de capacitores en redes eléctricas de distribución. Para ambos problemas, la búsqueda tabú es implementada en MatLab.

En el problema de localización óptima de capacitores, se hace uso del análisis de flujos de potencia basado en el método de Newton. A pesar de que este análisis introduce no linealidades a la función objetivo, la búsqueda tabú mostró un buen desempeño para los sistemas de prueba considerados para este análisis. En este trabajo se presentan dos sistemas de distribución radiales de 9 y 69 nodos de carga.

Abstract

The operation and planning of electrical networks frequently present the necessity to solve combinatorial optimization problems. These problems include: optimal network configuration design, distribution circuits reconfiguration, optimal capacitor placement, among others.

The simplest way to solve these optimization problems is by using the “brute force” (exhaustive search) strategy. This means that all the possible combinations are analyzed and evaluated and, among all of them, the best solution is selected. However, the computational time employed is very long and sometimes prohibitive even in problems with a few constraints and few decision variables.

Nowadays there are lots of heuristic techniques which try to find the solution of combinatorial optimization problems in an efficient way and with rational computational times. Some of these techniques are: genetic algorithms, neural networks, simulated annealing, Tabu search, etc.

In this thesis the Tabu search technique is presented and applied to solve combinatorial optimization problems in which is not possible to use gradient-based conventional techniques. This technique is applied to solve the problems of minimum spanning tree and the optimal capacitor placement problem in electrical distribution systems. In both problems, the Tabu search is implemented in MatLab.

In the optimal capacitor placement problem, a power flow analysis, that is based on the Newton’s method, is used. Although this analysis introduced non linear constraints to the objective function, the Tabu search showed a good performance in the tested systems. In this case, two distribution systems of 9 and 69 nodes, respectively, are presented.

Índice

Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice	v
Lista de Símbolos	viii
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras	xi

Capítulo 1 Introducción

1. 1 Justificación	1
1. 2 Objetivo	2
1. 3 Estado del arte	2
1. 4 Metodología	5
1. 5 Bibliografía comentada	9
1. 6 Descripción de la tesis	10

Capítulo 2 Marco Teórico

2. 1 Introducción	12
2. 2 Características de los SED	12
2. 3 Flujos de potencia convencionales	18
2. 4 Problema de localización de capacitores	22
2. 4. 1 Costo asociado a las pérdidas de potencia real	24
2. 4. 2 Costo asociado a los capacitores	25
2. 4. 3 Restricciones del problema de localización de capacitores	25
2. 5 Función de costos del problema de localización de capacitores	26
2. 6 Conclusiones	27

Capítulo 3 Búsqueda Tabú

3. 1 Introducción	28
3. 2 Conceptos básicos	28
3. 3 Elementos de la búsqueda tabú	31
3. 3. 1 <i>Selección de la solución inicial s_0</i>	32
3. 3. 2 <i>Elección del entorno $N(s)$</i>	32
3. 3. 3 <i>Tamaño de la lista tabú</i>	33
3. 3. 4 <i>Atributos a almacenar en la lista tabú</i>	34
3. 3. 5 <i>Nivel de aspiración</i>	34
3. 3. 6 <i>Criterio de paro</i>	35
3. 3. 7 <i>Intensificación y diversificación</i>	35
3. 4 Creación de la lista de soluciones factibles	36
3. 5 Elección del mejor movimiento factible	36
3. 6 Estrategia de oscilación	38
3. 7 Uso de memoria a corto plazo	39
3. 8 Uso de memoria de mediano y largo plazo	41
3. 9 Problema de las N-Reinas	43
3. 10 Árbol de expansión mínima	51
3. 11 Conclusiones	55

Capítulo 4 Búsqueda Tabú Aplicada al Problema de Localización de Capacitores en SED

4.1 Introducción	56
4. 2 Funcionamiento del programa de búsqueda tabú	57
4. 3 Sistema de 9 nodos de carga	59
4. 4 Sistema de 69 nodos	77
4. 5 Sintonización de parámetros	81
4. 5. 1 Tamaño de la vecindad	82
4. 5. 2 Tamaño de la lista tabú	83
4. 6 Conclusiones	85

Capítulo 5 Conclusiones y Trabajos futuros

5. 1 Conclusiones generales	86
5. 2 Recomendaciones	86
5. 3 Trabajos futuros	88

Bibliografía	89
---------------------	----

Apéndice A

Datos del sistema de 69 nodos	94
-------------------------------	----

Lista de Símbolos

$Z_{línea}$	Impedancia de línea
R_L	Resistencia de línea
X_L	Reactancia inductiva
I	Magnitud de Corriente
V_k	Magnitud de voltaje en el nodo k
V_m	Magnitud de voltaje en el nodo m
θ_k	Ángulo de voltaje en el nodo k
θ_m	Ángulo de voltaje en el nodo m
G_{kk}	Conductancia total del nodo k
G_{km}	Conductancia existente entre los nodos k y m
B_{kk}	Susceptancia total del nodo k
B_{km}	Susceptancia existente entre los nodos k y m
ΔP_k	Incrementos de potencia activa en el nodo k
P_{Gk}	Potencia activa generada en el nodo k
P_{Dk}	Potencia activa demandada en el nodo k
$P_k^{iny\ i}$	Potencias activa inyectada a través del elemento i conectado al nodo k
ΔQ_k	Incrementos de potencia reactiva en el nodo k
Q_{Gk}	Potencia reactiva generada en el nodo k
Q_{Dk}	Potencia reactiva demandada en el nodo k
$Q_k^{iny\ i}$	Potencias reactiva inyectada a través del elemento i conectado al nodo k
ΔP	Vector de incrementos potencia activa
ΔQ	Vector de incrementos potencia reactiva
ΔV	Vector incrementos de voltajes
x	Variable de estado
$F(x^{(i)})$	Vector de errores de potencia

$J(x^{(i)})$	Matriz Jacobiana
$\Delta X^{(i)}$	Vector de incrementos de las variables de estado del sistema
$ V_i $	Magnitud de voltaje en el nodo i
$V_{\min}$	Límite de voltaje mínimo
$V_{\max}$	Límite de voltaje máximo
$P_{T,loss}$	Pérdidas de potencia totales
$P_{loss}(i)$	Pérdidas de potencia en la línea i
Q_0^c	Tamaño de capacitores de capacidad c
C_i^c	Costo asociado al capacitor de capacidad c en el nodo i
K_p	Costo equivalente anual por unidad de pérdida de potencia
s_0	Condición inicial
$N(s)$	Vecindad o entorno adyacente a la solución actual
$C(s)$	Función de costos
s^*	Punto factible
T	Lista tabú
G	Gráfico no dirigido
V	Conjunto de vértices que representan los nodos en una red
E	Conjunto de enlaces que representa la conexión entre dos nodos
W	Peso asociado a cada enlace E

Lista de Tablas

Tabla 4.1. Impedancias del alimentador.	60
Tabla 4.2. Cargas del alimentador.	61
Tabla 4.3. Tamaños de capacitores y costo anual.	61
Tabla 4.4. Capacidades disponibles de capacitores.	62
Tabla 4.5. Condición inicial de la búsqueda.	63
Tabla 4.6. Iteración 1, caso 1.	64
Tabla 4.7. Iteración 2, caso 1.	65
Tabla 4.8. Iteración 3, caso 1.	66
Tabla 4.9. Iteración 4, caso 1.	66
Tabla 4.10. Iteración 4, caso 1.	67
Tabla 4.11. Condición inicial para el proceso de diversificación, caso 1.	68
Tabla 4.12. Iteración 4, caso 1.	68
Tabla 4.13. Solución parcial para el caso 1.	69
Tabla 4.14. Evolución del proceso de intensificación, caso 1.	69
Tabla 4.15. Resultado de la búsqueda para el caso 1.	69
Tabla 4.16. Voltajes máximo y mínimo en p.u.	70
Tabla 4.17. Resultado de la búsqueda exhaustiva considerando 3 localizaciones.	71
Tabla 4.18. Voltajes máximo y mínimo en p.u.	71
Tabla 4.19. Conexión inicial para el problema con 9 nodos de carga.	73
Tabla 4.20. Evolución de la búsqueda para el problema con 9 nodos de carga.	73
Tabla 4.21. Resultado para el problema con 9 nodos de carga.	74
Tabla 4.22. Voltaje máximo y mínimo para el problema con 9 nodos de carga.	74
Tabla 4.23. Voltajes antes y después de la compensación para la red de 9 nodos.	76
Tabla 4.24. Pérdidas y costos antes y después de la compensación red de 9 nodos.	76
Tabla 4.25. Tamaños de capacitores y costo anual.	78
Tabla 4.26. Capacidades de capacitores disponibles.	78
Tabla 4.27. Resultado de la búsqueda, red de 69 nodos.	80
Tabla 4.28. Voltajes antes y después de la compensación para la red de 69 nodos.	80
Tabla 4.29. Pérdidas y costos antes y después de la compensación red de 69 nodos.	80

Lista de Figuras

Figura 1.1. Función de dos variables.	7
Figura 1.2. Proceso de búsqueda.	8
Figura 1.3. Evolución de la búsqueda.	9
Figura 2.1. Red de distribución típica.	14
Figura 2.2. Bus infinito.	15
Figura 2.3. Modelo de línea: impedancia serie.	16
Figura 2.4. Modelo de susceptancia fija.	17
Figura 2.5. Balance de potencias en el nodo k .	18
Figura 2.6. Diagrama de flujo de un algoritmo de flujos de potencia básico usando el método Newton — Raphson.	21
Figura 3.1. Funcionamiento básico de la búsqueda tabú.	30
Figura 3.2. Elección del mejor movimiento.	37
Figura 3.3. Espacio de solución y evolución de la búsqueda.	38
Figura 3.4. Las cuatro dimensiones de la búsqueda tabú.	39
Figura 3.5. Estrategia de intensificación.	42
Figura 3.6. Estrategia de diversificación.	42
Figura 3.7. Tablero de ajedrez con 7 reinas y cuatro “ataques”.	44
Figura 3.8. Permutación inicial.	44
Figura 3.9. Intercambio entre las reinas 2 y 6.	45
Figura 3.10. Estructura usada para la lista tabú.	45
Figura 3.11. Iteración 0, para el problema de 7-reinas.	46
Figura 3.12. Iteración 1, problema de 7-reinas.	47
Figura 3.13. Iteración 2, problema de 7-reinas.	48
Figura 3.14. Iteración 3, problema de 7-reinas.	49
Figura 3.15. Iteración 4, problema de 7-reinas.	49
Figura 3.16. Iteración 5, problema de 7-reinas.	50
Figura 3.17. Solución óptima para el problema de 7-reinas.	50

Figura 3.18. Redes conectadas tipo árbol.	51
Figura 3.19. Gráfico no dirigido.	53
Figura 3.20. AEM encontrado con la búsqueda tabú.	54
Figura 4.1. Diagrama de flujo del programa de localización de capacitores usando búsqueda tabú.	58
Figura 4.2. Alimentador de 9 secciones de carga de 23 kV.	42
Figura 4.3. Lista tabú inicial (7), para el problema de localización de capacitores.	63
Figura 4.4. Lista tabú para la primera iteración.	64
Figura 4.5. Lista tabú para la segunda iteración.	65
Figura 4.6. Lista tabú para la tercera iteración.	66
Figura 4.7. Lista tabú para la cuarta iteración.	67
Figura 4.8. Lista tabú para la cuarta iteración.	67
Figura 4.9. Evolución de la búsqueda tabú considerando 3 ubicaciones.	70
Figura 4.10. Evolución de la búsqueda tabú considerando todos los nodos.	75
Figura 4.11. Distribución de soluciones para alimentador de 9 nodos.	75
Figura 4.12. Sistema radial de 69 Nodos.	77
Figura 4.13. Evolución de la búsqueda tabú, sistema de 69 nodos.	81
Figura 4.14. Alimentador de 5 nodos.	82
Figura 4.15. Calidad de la solución obtenida vs Tamaño de la lista tabú, sistema de 9 nodos.	84
Figura 4.16. Calidad de la solución obtenida vs Tamaño de la lista tabú, sistema de 69 nodos.	85
Figura A.1. Sistema radial de 60 nodos.	94

Capítulo 1

Introducción

1. 1 Justificación

Dentro de los sistemas eléctricos, una de las preocupaciones más importantes de la industria eléctrica es proporcionar una energía de calidad al usuario final. Donde la calidad de la energía está determinada por la continuidad en el suministro de la energía, la poca o nula variación tanto en el voltaje como en la frecuencia, la menor cantidad de deformaciones producidas por armónicas en la red eléctrica, entre otras.

Para cumplir con ello, se hacen esfuerzos en las áreas de planeación y desarrollo de sistemas y equipo que puedan cumplir con estándares de calidad que garanticen el suministro de energía.

Lamentablemente el crecimiento de las redes se ha dado en una forma aleatoria, desorganizada y desmedida.

Así, un sistema de distribución diseñado para suministrar energía a cierto número de usuarios con un cierto tipo de demanda, cambia su demanda de energía a capricho de los usuarios que instalan o adquieren equipos que consumen una mayor cantidad de energía o emplean diferentes tipos de conexiones que van cambiando las características de la demanda, y por tanto la energía presente en toda la red se modifica. Además se presentan los siguientes problemas:

- Se incrementa la demanda de reactivos en la red;
- Se degrada el perfil de voltaje;
- Se modifica el factor de potencia; y
- Se incrementan las pérdidas de potencia en la red.

Todos estos factores afectan no sólo al usuario, sino también a la empresa que suministra la energía, debido a que las pérdidas de energía se traducen en pérdidas económicas.

Existen varias opciones para dar solución a los problemas mencionados: reconfiguración de la red, balanceo de carga, cambio de niveles de voltaje e instalación de capacitores, por mencionar algunas.

Precisamente en la instalación de capacitores se centra este trabajo, considerándolo como una buena opción para mejorar el perfil de voltaje en la red y disminuir las pérdidas de potencia cuando las demás opciones no son muy factibles.

El problema en particular consiste en encontrar la localización, el tamaño y el número de capacitores que sea óptimo para instalarse en una red eléctrica particular, considerando el mejorar las características del sistema, reducir las pérdidas e implique el menor costo para la compañía que suministra la energía.

1. 2 Objetivo

En este trabajo se presenta el método de la búsqueda tabú [Glover 1986] para la solución de problemas de Optimización Combinatoria que se presentan en los Sistema Eléctricos, particularmente en los Sistemas Eléctricos de Distribución (SED). El objetivo es desarrollar un programa en MatLab para resolver el problema concreto de la Localización Óptima de Capacitores en redes de distribución radiales. El algoritmo se implementará en MatLab, el cual da muchas facilidades para la implementación del algoritmo aunque el tiempo computacional sea considerable comparado con lenguajes de programación como FORTRAN o C++.

1. 3 Estado del Arte

Varios trabajos han sido desarrollados para resolver el problema de localización óptima de capacitores en sistemas de distribución. Se han empleado una gran variedad de técnicas, considerando diferentes parámetros con la intención de dar a este problema una solución que sea óptima y sea obtenida en el menor tiempo empleando la menor cantidad de recursos computacionales.

Inicialmente se intentó resolver el problema empleando métodos analíticos considerando ideales tanto los alimentadores como las cargas. En [Civanlar y Grainger, 1985] se plantea la solución considerando principalmente el control de voltaje y el control de potencia activa. Se emplean reguladores de voltaje y capacitores en derivación, y la solución óptima se obtiene considerando aspectos reales del sistema y los costos de instalación de los capacitores.

En [Refaey, Ghandakly y Azzoz, 1990] se desarrolla una metodología basada en el uso de sensibilidades lineales, empleada para controlar el flujo de potencia activa en el sistema eléctrico. En este documento se logra determinar el número mínimo de capacitores que inyecten la potencia reactiva necesaria para corregir el perfil de voltaje en los nodos del sistema.

Se han empleado también técnicas numéricas para la solución del problema de localización de capacitores. En [Bala, Kuntz y Pebles, 1997] se hace uso de la programación lineal para reducir las pérdidas en el sistema eléctrico mediante la localización óptima de capacitores. Se consideran tanto restricciones de voltaje como la variación de la carga conectada.

En [Baran y Wu 1989] se emplea la técnica de programación entera mixta aplicándola a un sistema conformado por 69 nodos. Se considera un sistema radial en el que se desea determinar la localización, tipo y tamaño de los capacitores. Se consideran restricciones de voltaje y variación de la carga. El objetivo, es reducir las pérdidas en el sistema y los picos de potencia considerando el costo de los capacitores. El problema se descompone en un problema maestro, el cual determina la localización, y el esclavo que determina el tipo y tamaño de los capacitores.

Algunas aplicaciones al problema de localización de capacitores se han dado a la tarea de considerar parámetros reales obtenidos directamente de la red eléctrica. Tal es el caso de [Sochuliakova, Niebur y Richardson, 1991], donde se emplea un sistema SCADA para obtener la información de un sistema de distribución de tipo radial. La información es procesada, se analiza y se obtienen los datos de entrada para

el algoritmo computacional. En este desarrollo se consideran el tipo, la capacidad y la localización de los bancos de capacitores que mejoren las condiciones del sistema con el mínimo costo de inversión.

También han sido empleadas técnicas heurísticas a la solución del problema óptimo de localización. Este tipo de técnicas permiten aproximar soluciones óptimas combinándose con técnicas numéricas o técnicas basadas en inteligencia artificial.

En [Sundhararajan y Pahwa, 1994] se utilizan algoritmos genéticos, donde se resuelve la localización óptima de capacitores para sistemas radiales considerando alimentadores no uniformes y variaciones de los parámetros de las cargas. Además se incluyen costos de instalación, adquisición, operación y vida útil de los capacitores para disminuir las pérdidas de potencia al máximo posible. En este trabajo se hace un análisis previo de sensibilidades para disminuir el número de nodos candidatos para la ubicación de capacitores, con lo cual el espacio de soluciones disminuye al considerar solamente una fracción del total de los nodos del sistema.

El Recocido Simulado (*Simulated Annealing*), una técnica diseñada para resolver problemas de optimización combinatoria [Metropolis et al., 1953], es también empleada en la localización óptima de capacitores. En [Chiang, Wang, Cockings y Shin, 1990] se propone un algoritmo basado en esta técnica heurística, en la cual se resuelve la localización óptima de capacitores, considerando la ubicación, el tamaño y tipo de capacitor, así como el esquema de control del mismo. Con esta metodología se logra obtener el óptimo global.

Las redes neuronales artificiales también han sido aplicadas a resolver el problema de localización óptima de capacitores. En [Santoso y Tan, 1990] se propone un sistema experto que emplea una red neuronal de dos capas, el cual se implementa para resolver el problema en tiempo real, considerando la reducción de las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico. Los datos del sistema se obtienen por medición directa de las potencias activa y reactiva, y los voltajes.

Cada una de las técnicas empleadas para la solución del problema de localización óptima de capacitores, cuentan con características particulares muy marcadas. Algunos investigadores han aprovechado tales características combinando varios métodos, explotando las ventajas de cada uno de ellos. En [Ghose, Goswami y Basu, 1998] se hace uso del método del recocido simulado combinado con un algoritmo genético. En él se lleva a cabo la localización óptima de capacitores incluyéndose variaciones en las cargas y los costos de los capacitores. Se optimiza la reducción de las pérdidas en sistemas de distribución.

En [Miu, Chiang y Darling, 1997] se presenta un algoritmo genético combinado con una técnica heurística. En la primera etapa el algoritmo genético se encarga de definir las zonas donde las acciones de control puedan tener mayor impacto. En la segunda etapa le corresponde a la técnica heurística determinar la ubicación de los capacitores en el sistema, basándose en un análisis de sensibilidades de pérdidas. La idea es determinar la localización y control en sistemas de distribución desbalanceados.

1. 4 Metodología

Existen en la actualidad una amplia variedad de problemas de optimización en la planeación y operación de los sistemas eléctricos. Por mencionar algunos ejemplos, planeación o expansión de redes, coordinación de protecciones en sistemas de distribución, planes de mantenimiento de generadores, localización de capacitores, etc. En este tipo de problemas es muy difícil encontrar una solución óptima global debido a que el espacio de soluciones es muy grande, es decir, se tiene un gran número de posibles soluciones.

A este tipo de problemas se les conoce como NP-Duros. Es decir, que si se emplea un método determinístico que nos garantice llegar a una solución óptima, el tiempo computacional para obtenerla puede ser muy elevado y en ocasiones impráctico.

Como una alternativa para resolver este tipo de problemas surgen las técnicas heurísticas o aproximadas. “Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución,” [Red HEUR, 2005]. Los métodos heurísticos proporcionan una buena solución del problema, no necesariamente el óptimo, en tiempos relativamente pequeños si los comparamos con los métodos exactos, lo cual han llevado a la utilización de los métodos heurísticos en la mayor parte de las aplicaciones.

A principio de la década de los 80 comenzaron a aparecer una serie de métodos bajo el nombre de Metaheurísticos con el propósito de obtener mejores resultados que los alcanzados por los heurísticos tradicionales.

Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Ellos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos” [Osman y Kelly, 1996].

Así pues, los procedimientos Metaheurísticos se sitúan conceptualmente “por encima” de los heurísticos en el sentido que guían el diseño de éstos. Así, al enfrentarnos a un problema de optimización, podemos escoger cualquiera de estos métodos para diseñar un algoritmo específico que lo resuelva aproximadamente [Red HEUR, 2005].

Dentro de las técnicas Metaheurísticas se encuentra la búsqueda tabú, la cual en su forma básica fue desarrollada y propuesta por Fred Glover [Glover 1986], y se basa en el empleo de *memorias a corto y largo plazo* para guiar la búsqueda.

Este método hace uso de procedimientos diseñados para cruzar límites de optimalidad local. La idea fundamental es ir más allá de esas barreras y explorar nuevas regiones en busca de óptimos globales.

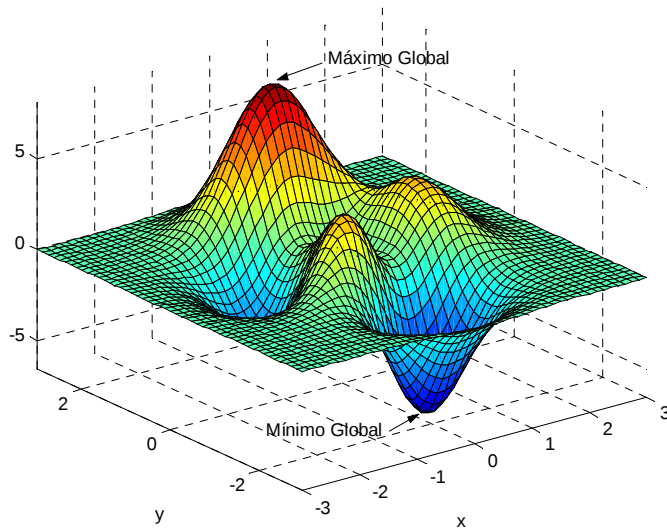
Para lograr esto, este método crea una lista tabú ***T*** en la cual lleva la “memoria” de las soluciones visitadas con anterioridad. A través de ella, mediante la

restricción de movimientos, el método puede “escapar” de mínimos locales llevando la búsqueda a nuevas regiones dentro del espacio de soluciones.

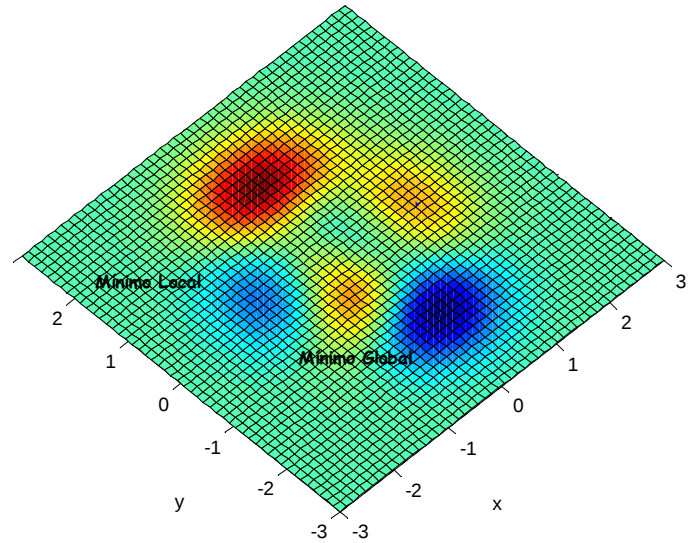
Además de la restricción de movimientos también existe la “liberación” de ellos, es decir, si un movimiento está prohibido puede realizarse siempre y cuando éste cumpla con ciertos criterios preestablecidos.

Esta técnica ha sido aplicada a una gran variedad de problemas, donde los espacios de búsqueda pueden ser suaves o con saltos violentos, convexos o no convexos; puede emplearse en funciones continuas o discontinuas; y no importa si la función objetivo es lineal o no lineal.

Considérese una función de dos variables la cual se ilustra en la Figura 1.1(a) la cual tiene 3 máximos y dos mínimos. En la Figura 1.1(b) se muestra una vista aérea de la Figura 1.1(a), las partes oscuras muestran la ubicación de los máximos y mínimos y se etiquetan el mínimo global y el mínimo local.



(a) Plano en tres dimensiones



(b) Vista aérea

Figura 1.1. Función de dos variables.

La grafica de la Figura 1.1(a) corresponde a la función de dos variables:

$$f(x, y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2} \quad (1.1)$$

Al intentar encontrar el mínimo global de la función 1.1, la mayoría de los métodos convencionales basados en gradiente pueden quedar “atrapados” en el óptimo local si el punto inicial de la búsqueda parte de un lugar cercano a él.

En la Figuras 1.2(a) y (b), se muestra el recorrido de la búsqueda empleando una técnica basada en gradiente y otra basada en la búsqueda tabú, el recorrido es indicado por las flechas. En ambas figuras el punto de inicio se encuentra ubicado en una misma región. En ambos casos, la búsqueda tiende hacia el mínimo local, pero en el primero de los casos la búsqueda se queda atrapada en ese mínimo local y el resultado que obtiene no es el óptimo (Figura 1.2(a)). En el segundo caso (Figura 1.2(b)), al emplear la búsqueda tabú, la búsqueda logra escapar del mínimo local y además se reorienta hacia otras regiones en las que al final logra alcanzar el mínimo global.

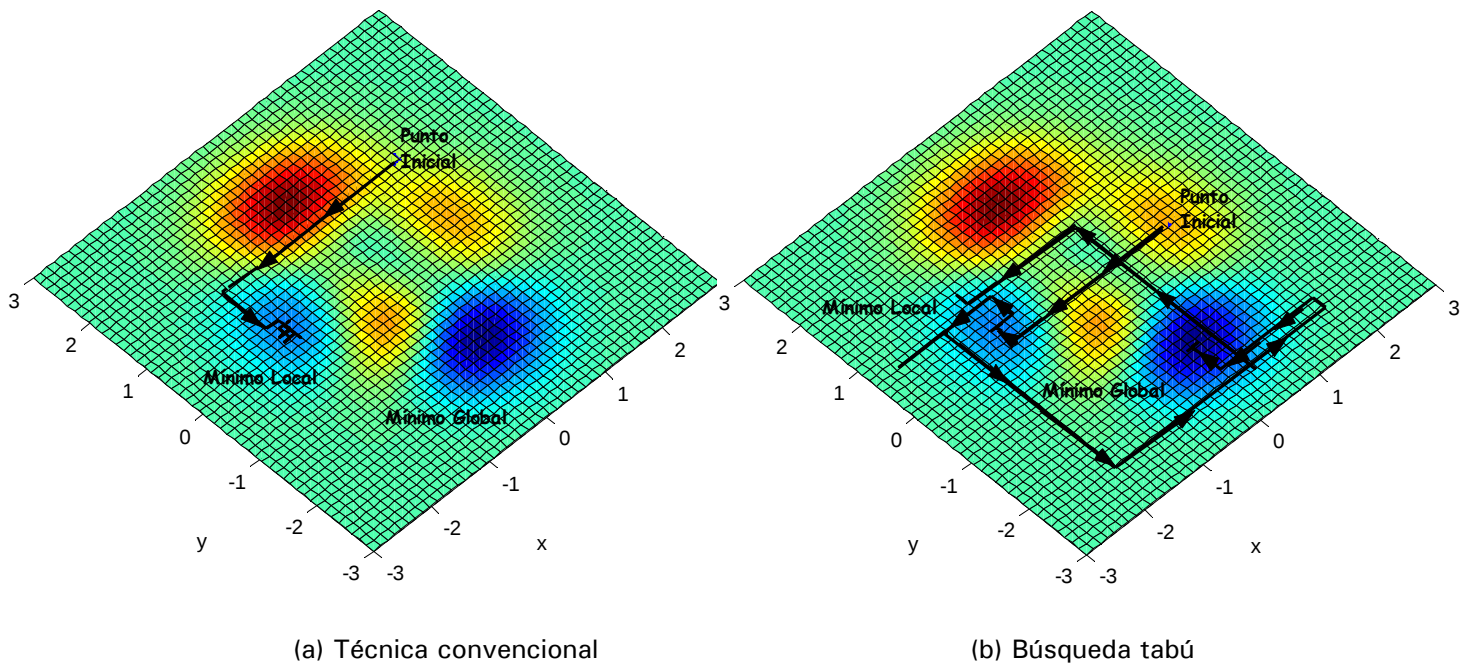


Figura 1.2. Proceso de búsqueda.

Para ambos casos el número de iteraciones fue el mismo.

El comportamiento del valor de la función objetivo durante el proceso de búsqueda se ilustra en la Figura 1.3. En la cual se puede observar que la búsqueda escapa dos veces del óptimo local, pero al fin converge hacia el óptimo global.

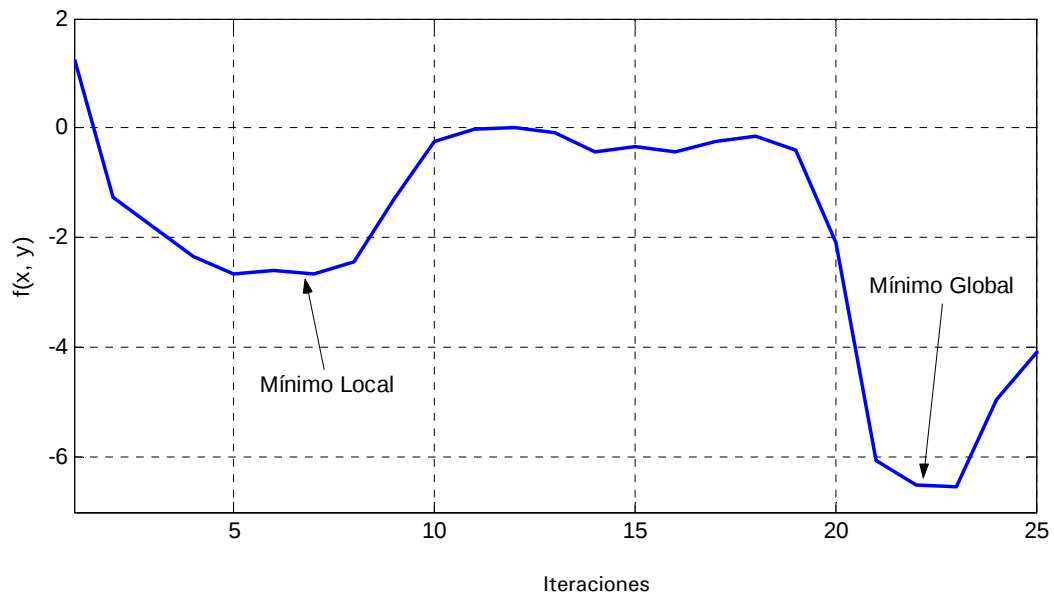


Figura 1.3. Evolución de la búsqueda.

A pesar que la condición inicial fue generada en forma aleatoria, en la búsqueda tabú la aleatoriedad es minimizada, es decir, la búsqueda es un proceso en el cual el historial de la búsqueda da pistas importantes para explorar el espacio de soluciones en busca de soluciones óptimas.

1. 5 Bibliografía comentada

En la actualidad existe suficiente literatura para comprender el funcionamiento de la búsqueda tabú así como algunas de sus aplicaciones.

Desde luego una de las primera referencias que se tiene acerca del surgimiento de la técnica de la búsqueda tabú es [Glover 1986]. Los fundamentos de lo que actualmente es la técnica de la búsqueda tabú, se encuentran contenidos básicamente en dos referencias. En [Glover 1989] se hace una primera descripción comprensiva de la búsqueda tabú y en [Glover 1990] se describe una segunda parte de la búsqueda tabú introduciendo mecanismos adicionales de la técnica.

Dentro de la literatura que trata la técnica de la búsqueda tabú se encuentra [Glover y Laguna, 2001], en donde se explica en forma amplia cada uno de los elementos que la conforman la técnica tabú. También se describen ampliamente cada una de las partes y elementos que conforman la búsqueda tabú y da algunas sugerencias para aplicarla a diferentes problemas de optimización. Es un libro muy completo que puede ayudar a comprender y aplicar la búsqueda tabú a diferentes de problemas de optimización.

La búsqueda tabú ha sido aplicada a una amplia variedad de problemas de optimización. Actualmente están surgiendo varios trabajos que utilizan la búsqueda tabú como técnica para la solución de problemas de optimización. En cada una de ellas se tienen diferentes consideraciones, parámetros, pero la técnica en esencia es la misma.

En [Huang y Yang y Huang C.L. 1996] y [Su y Lee 2002] se aplica la búsqueda tabú a problemas de localización de capacitores (problema al que se aplica en este trabajo).

Ahora bien, si se desea conocer algunas otras metodologías heurísticas aplicadas a problemas de optimización en sistemas de eléctricos se puede consultar [Song e Irving 2001].

1. 6 Descripción de la tesis

En el capítulo 2 se lleva a cabo el modelado de los componentes del sistema eléctrico de distribución. Además se describe brevemente el análisis de flujos de potencia que es empleado para obtener las pérdidas de potencia en la red y los voltajes nodales. También se describen la función objetivo y las restricciones del problema de localización de capacitores.

En el capítulo 3 se explica el funcionamiento de la técnica de la búsqueda tabú y de cada uno de los elementos que la conforman. También se presentan dos ejemplos a los cuales se aplica la búsqueda tabú: el problema de las N-Reinas y el

problema del árbol de expansión mínima, en los cuales se ilustra el funcionamiento de la búsqueda tabú.

En el capítulo 4 se aplica la búsqueda tabú al problema de localización óptima de capacitores. En este capítulo, se explica el programa que se desarrolló para la localización óptima de capacitores y se muestran los resultados obtenidos en dos sistemas de prueba de 9 nodos de carga y 69 nodos de carga, respectivamente.

Se espera encontrar el número, la capacidad y la ubicación óptima de los capacitores para disminuir las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de voltaje en cada uno de los nodos de los sistemas mencionados previamente.

Finalmente en el Capítulo 5 se dan las conclusiones del trabajo, algunas recomendaciones al aplicar la búsqueda tabú y los posibles trabajos futuros que podrían llevarse a cabo a partir de esta tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2. 1 Introducción

El estudio más frecuente en cualquier sistema eléctrico es el cálculo de las condiciones de operación en régimen permanente. Lo que interesa conocer son los voltajes en cada uno de los nodos del sistema, los flujos de potencia en cada una de las líneas y las pérdidas de potencia en cada uno de los elementos de la red.

Este tipo de estudios son muy importantes tanto en sistemas existentes, como en el diseño de nuevas redes, ya sean redes de transmisión o redes de distribución. Lo anterior para garantizar el suministro de energía eléctrica con las características especificadas para cada usuario.

Una de las herramientas principales de análisis para redes eléctricas, son los flujos de potencia monofásicos (o trifásicos) desarrollados para sistemas eléctricos de transmisión.

Los sistemas de interés del presente trabajo son los Sistemas Eléctricos de Distribución (SED). El análisis de este tipo de sistemas se hace partiendo de la formulación general de flujos de potencia, mayormente empleado en sistemas eléctricos de potencia. En secciones siguientes se explica la formulación general de los flujos de potencia.

2. 2 Características de los SED

Las redes de distribución a diferencia de las redes de transmisión, presentan algunas características muy particulares:

- Topologías radiales.
- Conexiones múltiples: monofásicas, bifásicas, trifásicas.
- Cargas de distinta naturaleza.

- Líneas cortas donde la resistencia tiene comparación con la reactancia.
- Entre otras.

Las redes de distribución al ser típicamente radiales, el flujo de potencia nace solamente desde un punto en la red, en este caso la subestación. En contraste con los sistemas de transmisión, donde puede haber más de un suministro de potencia y pueden existir lazos en la red. La subestación es el punto de la red donde se reducen los niveles de voltaje de alta tensión a niveles de media tensión.

En este tipo de sistemas se pueden encontrar muchos tipos de conexiones. Si bien predominan las redes trifásicas, es frecuente encontrar cargas bifásicas (especialmente en zonas rurales), cargas monofásicas (cargas residenciales, comerciales) y obviamente cargas trifásicas (cargas industriales y comerciales). Cada uno de estos tipos de carga posee un factor de potencia típico y un comportamiento determinado frente a variaciones de voltaje y de temperatura

Los desequilibrios que se presentan debido a la diversidad de cargas presentes en el sistema, tratan de amortiguarse repartiendo equitativamente las cargas en cada una de las fases. Lamentablemente la red se sigue expandiendo y el desbalance se incrementa en forma desmedida.

Otra característica de la red de distribución es que las líneas son cortas, por lo que no existen transposiciones. Por tanto las caídas de tensión debido a los acoplamientos entre las fases son desbalanceadas.

La naturaleza desbalanceada de las cargas en los sistemas de distribución hace que el análisis de flujos de potencia sea un poco más complicado que en el caso de sistemas de transmisión.

En este trabajo y para simplificar este análisis, se considera que el SED es balanceado, reduciéndose el problema a considerar solamente una de las fases del sistema.

Si se desea hacer un análisis más preciso del SED se tendría que considerar el sistema trifásico desbalanceado y realizar un análisis de flujos de potencia trifásico.

Es importante considerar que la metodología empleada para un sistema donde se consideran las tres fases, es la misma. Solamente se debe incluir un algoritmo de flujos de potencia trifásico para SED. En la actualidad ya se ha desarrollado varios de estos algoritmos aplicados a SED.

La red de distribución se considera a nivel de media tensión, donde los elementos presentes en la red son:

- Subestación (nodo fuente).
- Líneas de Distribución.
- Cargas.
- Capacitores.
- Transformadores.

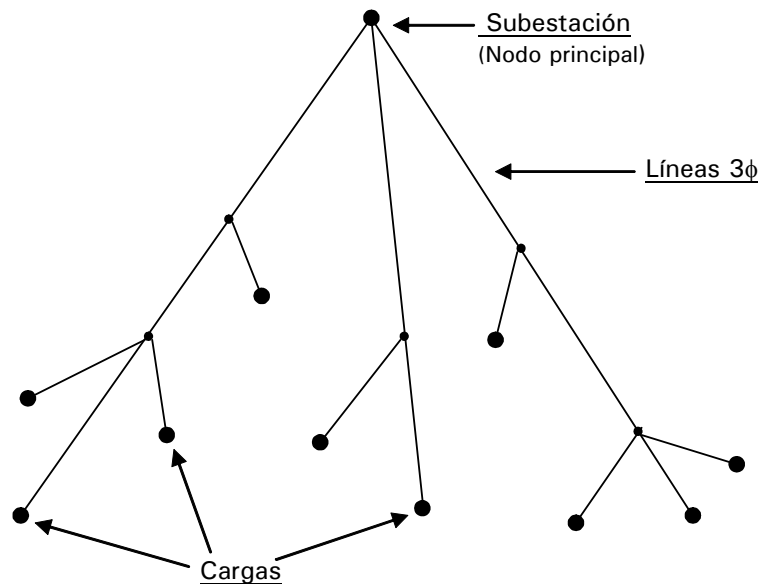


Figura 2.1. Red de Distribución Típica.

En la Figura 2.1, se muestran los elementos que conforman la red de media tensión en el SED. La subestación es el nodo desde donde se suministra el total de la potencia demandada por las cargas en el sistema, tanto activa como reactiva. Las líneas de distribución son la vía para que la energía fluya hacia todos los puntos de

demanda de energía en la red, es decir, las cargas. Los transformadores pueden integrarse como una impedancia a las líneas de distribución si se considera que el tap en el que se encuentran conectado es el nominal.

Análogamente a los sistemas eléctricos de transmisión, la subestación se comporta como si fuese el generador y es el nodo que idealmente entrega toda la potencia, tanto activa como reactiva, que el sistema de distribución le demande (Figura 2.2). Idealmente se considera que en este nodo tanto el voltaje como la frecuencia (en magnitud y ángulo) no varían. En sistemas eléctricos de potencia, un bus que tiene una capacidad muy grande en comparación con la carga que se conecta a él se puede considerar como bus infinito.

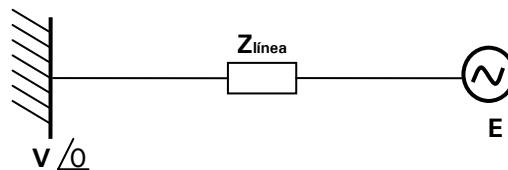


Figura 2.2. Bus Infinito.

En lo que se refiere a las cargas presentes en el sistema, se deben considerar dos aspectos:

- En el primero se consideran la existencia de una gran variedad de consumos conectados al sistema: motores, iluminación, calentadores, equipo doméstico, etc. Cada elemento requiere consumo de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) que debe ser suministrada. Ambos tipos de potencia dependen de varios factores tales como, el voltaje, la frecuencia, la temperatura, etc.
- El segundo de los aspectos es la variación en el tiempo en los consumos, debido a que en forma permanente se están conectando y desconectando cargas en forma aleatoria. Esto se hace importante cuando se desea evaluar pérdidas y

consumos de energía en un periodo de tiempo determinado (horas, días, años, etc.) y se resuelve empleando curvas de carga diaria.

En este trabajo, no es relevante qué tipo de cargas están conectadas a cada uno de los nodos. Se consideran solamente las demandas tanto de potencia activa como de potencia reactiva en cada uno de los nodos del sistema, tomando un equivalente de consumo de P y Q en cada nodo de la red. Por tanto se emplea el primer aspecto mencionado anteriormente.

Las líneas de distribución son trifásicas, pero para este caso en que se considera el sistema balanceado, se reduce el problema a considerar sólo una de las fases.

En la formulación de flujos de potencia se emplea el modelo π de la línea de transmisión, pero como en el caso de distribución las líneas que se tienen son de corta longitud y los niveles de voltaje son bajos, la susceptancia capacitiva de las líneas se desprecia, y por tanto la impedancia serie es la única que se toma en consideración (ver Figura 2.3)

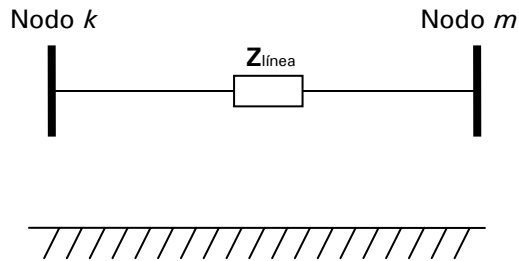


Figura 2.3. Modelo de línea: impedancia serie.

De la Figura 2.3 se tiene que:

$$Z_{línea} = R_L + jX_L \quad (2.1)$$

donde:

R_L es la resistencia de línea.

X_L es la reactancia inductiva de línea.

En cuanto a los capacitores en derivación, éstos son muy empleados en sistemas de distribución para diferentes propósitos, algunos de ellos son los siguientes:

- Aumentar los niveles de voltaje.
- Disminuir las corrientes en las ramas.
- Disminuir las pérdidas de potencia.
- Mejorar el factor de potencia.

Los capacitores, para el tipo de análisis que se va a realizar, se modelan como una susceptancia constante. En este caso el capacitor es considerado como una carga conectada a un nodo, como se observa en la Figura 2.4.

La susceptancia B_k se encarga de inyectar o absorber reactivos del sistema. Tiene un valor positivo en el caso de que se trate de un inductor, y un valor negativo cuando se considera un capacitor.

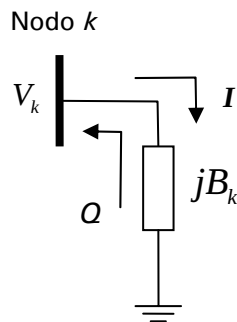


Figura 2.4. Modelo de susceptancia fija.

La Ecuación de corriente del circuito de la Figura 2.4 es:

$$I = jB_k V_k \quad (2.2)$$

y la Ecuación de potencia reactiva es,

$$Q = -V_k^2 B_k \quad (2.3)$$

donde:

B_k es la susceptancia del nodo k .

2. 3 Flujos de potencia convencionales

En esta sección se presenta la formulación general de flujos de potencia monofásicos en su forma convencional, para sistemas de transmisión. Se puede abundar del tema en [Arrillaga y Arnold, 1990; Grainger y Stevenson, 1996].

La formulación general del análisis de flujos de potencia está basada en el balance de potencia en cada uno de los nodos del sistema. Es decir, la suma de la potencia generada, la potencia demandada por las cargas y la potencia que se “consume” en los elementos que interconectan los nodos siempre debe ser cero.

Las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en el nodo k , se pueden establecer, a partir de la Figura 2.5, de la siguiente forma [Saadat, 2002]:

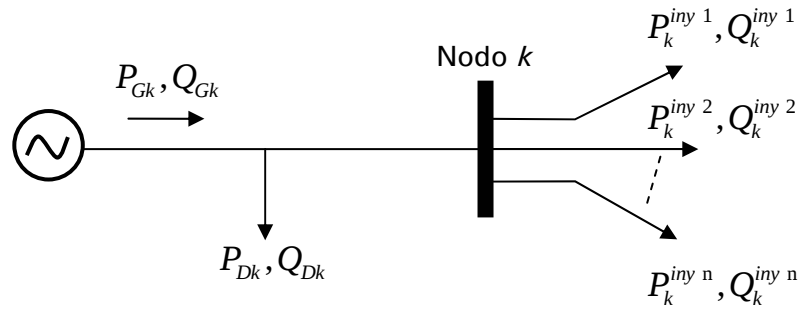


Figura 2.5. Balance de potencias en el nodo k .

De la Figura 2.5 se tiene que:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{i=1}^n P_k^{iny i} = 0 \quad (2.4)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk} - \sum_{i=1}^n Q_k^{iny i} = 0 \quad (2.5)$$

donde:

k es el nodo al que corresponden las ecuaciones de balance.

ΔP_k y ΔQ_k son los incrementos de potencia activa y reactiva, respectivamente.

P_{GK} y Q_{Gk} son las potencias activa y reactiva generadas.

$P_k^{iny\ i}$ y $Q_k^{iny\ i}$ son las potencias activa y reactiva inyectadas a través del elemento i conectado al nodo k .

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 son conocidas como ecuaciones de balance de potencia.

En forma explícita para las potencias inyectadas en el nodo k , se tienen las siguientes expresiones:

$$P_k^{iny\ i} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.6)$$

$$Q_k^{iny\ i} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.7)$$

donde:

$P_k^{iny\ i}$ y $Q_k^{iny\ i}$ son las potencias activa y reactiva inyectadas a través del elemento i conectado al nodo k .

V_k y V_m son las magnitudes de voltaje en los nodos k y m , respectivamente.

G_{kk} es la conductancia total del nodo k .

G_{km} es la conductancia existente entre los nodos k y m .

B_{kk} es la susceptancia total del nodo k .

B_{km} es la susceptancia existente entre los nodos k .

θ_k y θ_m son los ángulos de voltaje en los nodos k y m , respectivamente.

Las ecuaciones 2.6 y 2.7 representan las potencias activa y reactiva inyectadas a cada nodo en la red, respectivamente. Obsérvese que son ecuaciones no lineales.

A partir de la solución al conjunto de ecuaciones de balance de potencia, se puede determinar el estado estacionario del sistema.

Existen diferentes métodos numéricos para la solución de este tipo de ecuaciones. De entre ellos los métodos Newton - Raphson completo y sus versiones desacopladas son ampliamente conocidos por sus excelentes características de convergencia, especialmente las versiones desacopladas.

El método Newton - Raphson completo soluciona las ecuaciones de balance de potencia mediante la siguiente ecuación:

$$F(x^{(i)}) = J(x^{(i)})\Delta X^{(i)} \quad (2.8)$$

En forma extendida:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial Q} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (2.9)$$

Donde:

$F(x^{(i)})$ es el vector de errores de potencia.

$J(x^{(i)})$ es conocida como matriz Jacobiana y está compuesta por las derivadas parciales de las ecuaciones de potencia inyectadas respecto a las variables de estado.

$\Delta X^{(i)}$ es el vector de incrementos de las variables de estado del sistema.

El diagrama de flujo de un programa de flujos de potencia básico usando el método de Newton - Raphson se muestra en la figura 2.6 [Arrillaga y Arnold, 1991].

Siguiendo el algoritmo presentado en la figura 2.6, primeramente se leen los datos de entrada, se forma la matriz de admitancias del sistema, se leen las condiciones iniciales para los voltajes y ángulos en los nodos del sistema.

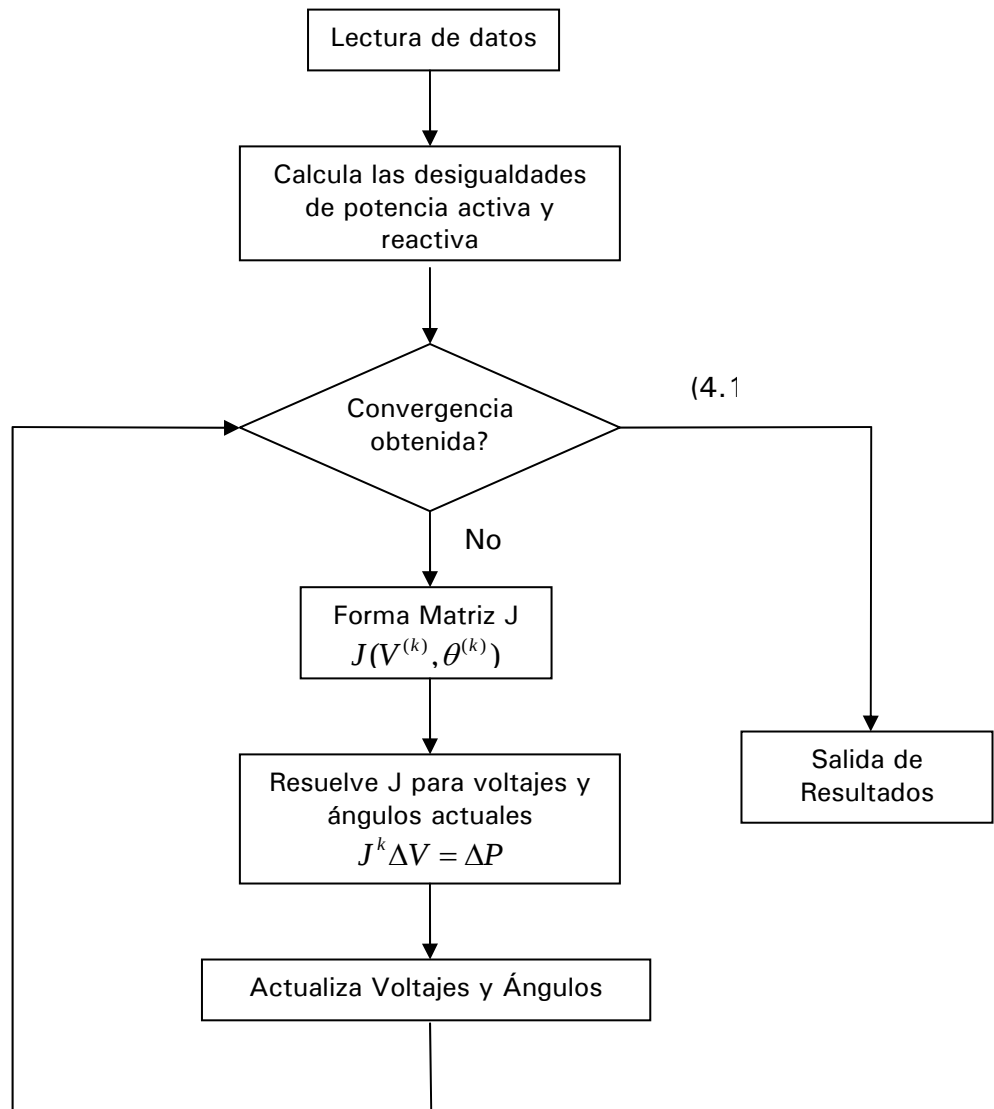


Figura 2.6. Diagrama de Flujo de un algoritmo de flujos de potencia básico usando el método Newton – Raphson.

A continuación se calculan las potencias activa y reactiva y se verifica si se cumple con el criterio de convergencia. Si es afirmativo, termina el proceso y se muestran los resultados.

En caso contrario, se forma el Jacobiano J y se resuelve para los voltajes y ángulos actualizados.

Después se actualizan los voltajes y ángulos y se revisan nuevamente los balances de potencia y el criterio de convergencia.

Se procede en esa forma hasta que el criterio de convergencia se cumple o hasta que se realiza un cierto número de iteraciones.

En lo referente al uso de los métodos Newton desacoplados, en ellos se contemplan una serie de aproximaciones que simplifican la matriz Jacobiana, haciendo que el tiempo de cada iteración se reduzca considerablemente.

Sin embargo, estas aproximaciones consideran un valor alto de la razón X/R que no es efectivo en SED donde esta razón tiene un amplio rango de variación, pudiendo llegar a ser menor que uno. Por tanto no es recomendable utilizar estos métodos desacoplados en SED.

Existen otros métodos para el cálculo de los flujos de potencia en sistemas de distribución, los cuales explotan la estructura radial de los SED. Este tipo de métodos son computacionalmente más eficientes que los métodos Newton. Sin embargo en este trabajo se hará uso del método de Newton - Raphson en su versión completa, buscando aprovechar la convergencia cuadrática de mismo.

2. 4 Problema de localización de capacitores

El problema de localización óptima de capacitores consiste en encontrar, dentro de una red eléctrica, la mejor ubicación de éstos dispositivos que nos puedan reducir las pérdidas y mejorar los niveles de voltaje en el sistema con el menor costo posible. Se pueden tener otras consideraciones, tales como mejorar la confiabilidad del sistema, la seguridad, etc., pero no es el objetivo de este trabajo. Sin embargo tales consideraciones se pueden implementar sin mayores complicaciones conceptuales.

Las variables que se consideran para resolver el problema de localización de capacitores, depende de qué es lo que se desee mejorar (u optimizar) dentro de una red eléctrica determinada. Así, en una red eléctrica de potencia se pueden tener diferentes consideraciones que en una red eléctrica de distribución, ya que las necesidades pueden ser diferentes en cada una de ellas.

En general, lo que se desea optimizar cuando se realiza el análisis de localización óptima de capacitores es minimizar una función objetivo que depende, esencialmente, de las pérdidas de potencia y el costo de los capacitores.

El problema se puede plantear, matemáticamente, de la siguiente manera:

$$\text{Min } F \quad \text{donde} \quad F(C) = f(P) + f(C) \quad (2.10)$$

Sujeta a:

$$\Delta P_k = 0 \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_k = 0 \quad (2.12)$$

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (2.13)$$

Donde:

$F(C)$ es la función de costos.

$f(P)$ es el costo asociado a las pérdidas de potencia real en el SED.

$f(C)$ es el costo asociado a los capacitores instalados en el SED.

ΔP_k y ΔQ_k corresponden a las ecuaciones de incrementos de potencia (ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente).

$|V_i|$ es la magnitud de voltaje en el nodo i .

$V_{\min}$ y $V_{\max}$ son los límites de voltaje mínimo y máximo, respectivamente.

$i = 1, 2, 3, \dots, n$, son los índices de los nodos del SED.

2. 4. 1 Costo asociado a las pérdidas de potencia real

El primer elemento de la función de costos 2.10, es el costo asociado con las pérdidas de potencia real en el SED, que se define como:

$$f(P) = K_p P_{T,loss} \quad (2.14)$$

donde:

K_p es el costo equivalente anual por unidad de pérdida de potencia real.

$P_{T,loss}$ son las pérdidas de potencia real en el SED.

EL costo anual por unidad de pérdida de potencia real, K_p es dado en \$/(Kw-año), y es determinado por la compañía que suministra la energía.

Para obtener las pérdidas de potencia en el SED se emplean el análisis de flujos de potencia, el cual se describirá en una sección siguiente.

Las pérdidas de potencia totales son:

$$P_{T,loss} = P_G - P_D \quad (2.15)$$

donde:

P_G es la potencia total generada.

P_D es la potencia demandada por las cargas.

Las pérdidas totales son la resta de la potencia generada menos la potencia consumida por cada una de las cargas. Tanto en las líneas de distribución como en los equipos conectados al SED se consume energía, lo cual genera pérdidas en el sistema.

2. 4. 2 Costo asociado a los capacitores

El segundo elemento de la función de costos 2.10, es el costo asociado a los capacitores instalados en el SED y se define como:

$$f(C) = \sum_{i=1}^n C_i^c \quad (2.16)$$

donde:

C_i^c es el costo asociado al capacitor de capacidad c conectado en el nodo i .

n es el número de capacitores instalados en el SED.

Considerando capacitores en paralelo, existe una gran variedad de capacidades en el mercado que normalmente son múltiplos de un tamaño base. El costo por KVA varía de un tamaño a otro. Generalmente, los capacitores de mayor capacidad tienen un menor costo por unidad.

Resumiendo de la función de costos 2.16, el costo total debido a los capacitores es la suma de los costos de los capacitores instalados en el SED, por lo que también se debe considerar el número óptimo de capacitores a instalarse en la red.

2. 4. 3 Restricciones del problema de localización de capacitores

Las restricciones del problema de localización de capacitores son obtenidas de la solución de los flujos de potencia en el SED.

Las ecuaciones 2.11 y 2.12 son restricciones de igualdad y corresponden a las ecuaciones 2.4 y 2.5. Éstas son las ecuaciones de balance de potencia que se obtienen a partir de la formulación de flujos de potencia, las cuáles deben satisfacerse para que el análisis de flujos de potencia pueda realizarse.

La ecuación 2.13, es una restricción de desigualdad, en la que se desea que la magnitud de voltaje en todos los nodos del sistema se mantenga dentro de un cierto margen determinado por la compañía que suministra la energía, en este caso $V_{\min}$ y $V_{\max}$.

$|V_i|$ se obtiene a partir de la solución de los flujos de potencia en el SED. El programa obtiene los voltajes en todos los nodos del sistema.

2. 5 Función de costos del problema de localización de capacitores

La función de costos para el problema de localización de capacitores en forma extendida es por lo tanto:

$$\text{Min } F \quad \text{donde} \quad F(C) = K_p P_{T,loss} + \sum_{i=1}^n C_i^c \quad (2.17)$$

Sujeta a:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{i=1}^n P_k^{iny\ i} = 0 \quad (2.18)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk} - \sum_{i=1}^n Q_k^{iny\ i} = 0 \quad (2.19)$$

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (2.20)$$

Esta función de costo corresponde a un problema de optimización combinatoria donde la función objetivo tiene elementos no lineales y discretos.

Las ecuaciones de balance de potencia introducen las no linealidades a la función objetivo y al tener un número finito de capacidades de los capacitores, el problema contiene elementos discretos.

2. 6 Conclusiones

En este capítulo se presentó la formulación del problema de localización de capacitores, considerándose tanto las pérdidas de potencia en la red, como el costo debido a la instalación de los capacitores. Las restricciones consisten básicamente en mantener los voltajes nodales dentro de los márgenes permitidos y cumplir con las restricciones de los flujos de potencia.

La función de costos obtenida corresponde a un problema de optimización combinatoria no lineal y discreto además. Es necesario, por tanto, una técnica que dé una solución satisfactoria a este tipo de funciones. En el siguiente capítulo se describirá una técnica que es muy útil en la solución de este tipo de problemas de optimización.

Capítulo 3

Búsqueda Tabú

3. 1 Introducción

Una de las causas por las que en los años recientes se han desarrollado un número considerable de técnicas heurísticas es la abundancia de problemas de optimización de gran dificultad. Con este tipo de métodos se quiere obtener al menos un resultado muy bueno (subóptimo) en un periodo de tiempo corto en problemas que resultaría impráctico emplear la “fuerza bruta” o búsqueda exhaustiva.

Las técnicas heurísticas más conocidas hoy en día, adaptan ideas conocidas desde hace mucho tiempo. Por ejemplo, los algoritmos genéticos emulan los mecanismos de la evolución en la naturaleza; el Recocido Simulado está basado en un proceso físico de la industria metalúrgica.

La técnica de la búsqueda tabú se basa en conceptos tomados de la Inteligencia Artificial (IA), para resolver problemas de optimización combinatoria. Esta técnica es combinada con algún método de búsqueda, y lo que hace es evitar que durante el proceso de búsqueda este método quede atrapado en un óptimo local.

3. 2 Conceptos básicos

La búsqueda tabú es un procedimiento heurístico para resolver problemas de optimización combinatoria de gran dificultad. Cuya característica principal es “escapar” de la optimalidad local.

Oficialmente el nombre y la metodología fueron introducidos por Fred Glover en 1986 [Glover 1986].

En esencia la búsqueda tabú es un Metaheurístico que se puede utilizar para guiar procesos de búsqueda local con el fin de encontrar óptimos globales [Glover y Laguna 1993]. La búsqueda tabú hace el uso de estructuras que sirven para dirigir la búsqueda tomando en cuenta la historia de ésta. Es decir, el procedimiento extrae la información de la ruta recorrida y actúa de acuerdo con ella. Se puede decir entonces, que la búsqueda es “inteligente”.

En términos generales el método de búsqueda tabú puede explicarse de la siguiente manera [Glover y Laguna 1993]:

- *Se desea minimizar una función objetivo C , partiendo desde un punto inicial s_0 , dando pequeños pasos.*
- *Para esto se define la vecindad $N(s)$ como un conjunto de soluciones adyacentes a la solución s_0 .*
- *El paso básico del procedimiento consiste en empezar desde un punto factible s y generar un conjunto de soluciones en $N(s)$. De estas se elige la mejor, s^* , y se posiciona en este nuevo punto ya sea que $C(s^*)$ tenga o no mejor valor que $C(s)$.*
- *Los movimientos que se vayan realizando se almacenan en una lista tabú T y se consideran prohibidos durante un determinado número de iteraciones.*

Hasta este punto se está cercano a las técnicas de mejoramiento local a diferencia de que en la búsqueda tabú puede moverse desde s a una solución peor s^* [Glover y Laguna, 2001].

La característica importante de la búsqueda tabú es la creación de la lista tabú T , la cual guarda los movimientos realizados en iteraciones previas, que se etiquetan como prohibidos o tabú. Esta lista es usada para evitar regresar a un punto de solución previamente visitado, con lo que la búsqueda puede “escapar” de óptimos locales y visitar otras regiones del espacio de soluciones

En el diagrama de flujo de la Figura 3.1 se muestra el funcionamiento básico del algoritmo de la búsqueda tabú, mostrando cada uno de los elementos que la componen.

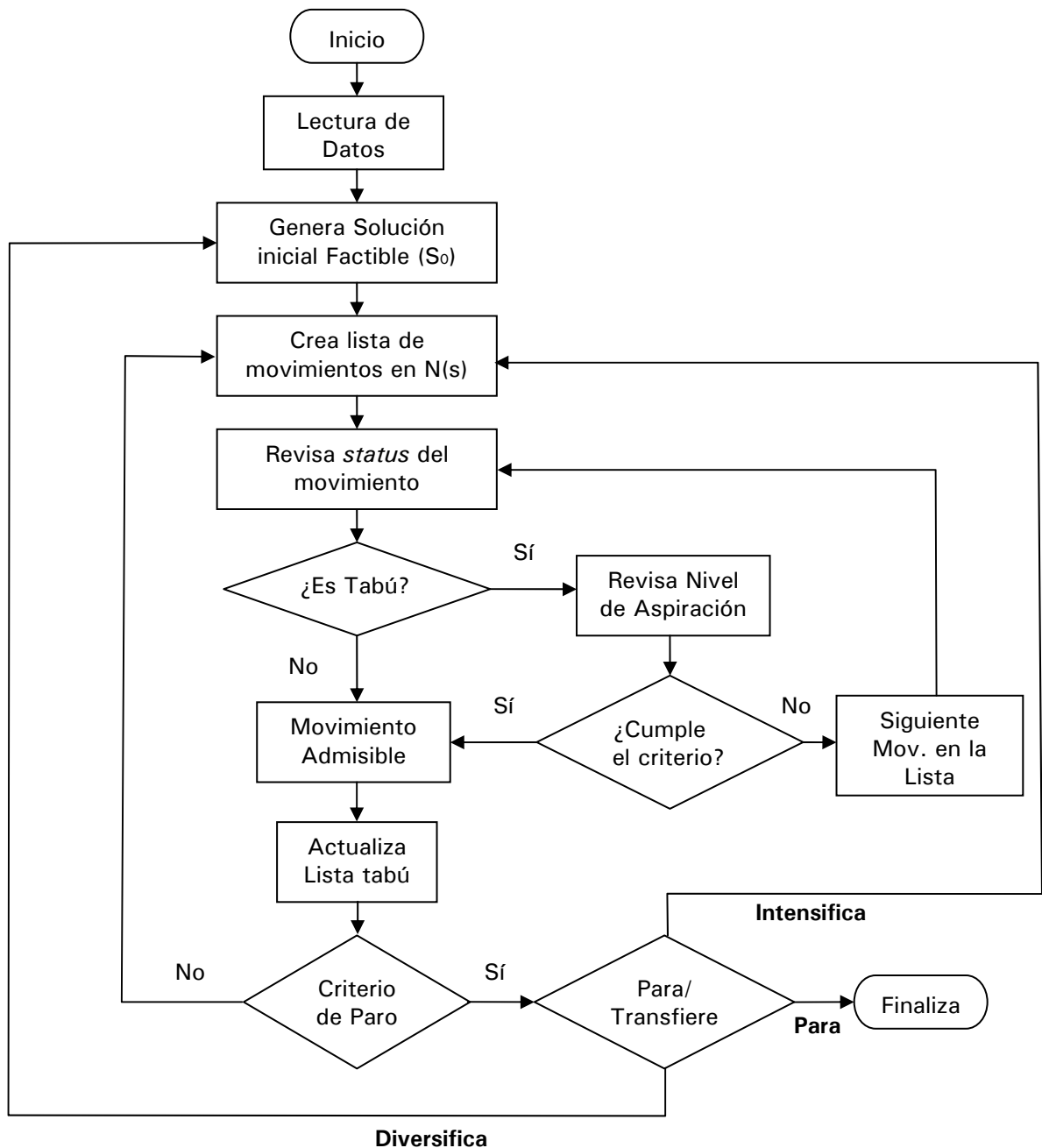


Figura 3.1. Funcionamiento básico de la búsqueda tabú.

Siguiendo el diagrama de flujo, primeramente se leen los datos tales como: condiciones iniciales, número de iteraciones de la búsqueda, datos del sistema que se va a resolver, entre otros.

A continuación, se genera una solución inicial factible s_0 para desde ella iniciar la búsqueda.

Alrededor de ese punto inicial s_0 , en la vecindad $N(s)$, se crea una lista de movimientos factibles hacia los cuales puede dirigirse la búsqueda.

De entre la lista de movimientos factibles se elige el mejor de ellos y se revisa si se encuentra contenido en la lista tabú T . De ser así, el movimiento se dice que es un *movimiento tabú o prohibido* y no se puede realizar a menos que cumpla con el *criterio de aspiración* (que se explicará más adelante). Si el movimiento tabú no cumple con el criterio de aspiración, se elige el siguiente movimiento en la lista y se repite el proceso.

En caso de que el movimiento no sea tabú, puede ser realizado y posteriormente es almacenado en la lista tabú. En este momento el movimiento es tabú durante un cierto número de iteraciones.

A continuación, si el criterio de paro no se ha cumplido, el algoritmo genera nuevamente una lista de movimientos factibles en la vecindad del nuevo punto s^* y se repite el proceso.

Cuando el criterio de paro se cumple, el algoritmo puede detenerse o transferir a alguna de las estrategias de *intensificación* o *diversificación* de la búsqueda (las cuales se explicarán después).

3. 3 Elementos de la búsqueda tabú

Los elementos básicos que componen la técnica de la búsqueda tabú se describen a continuación en forma más amplia.

3. 3. 1 *Selección de la solución inicial s_0*

Es importante considerar la influencia que tiene el comenzar la búsqueda desde una solución inicial s_0 más o menos buena. De una buena elección de ella, dependerá que se llegue a encontrar una solución óptima al problema que se desea optimizar.

Se puede pensar que con una solución inicial s_0 de bajo costo el algoritmo evolucionará en corto tiempo hacia soluciones mejores. En la práctica esto puede o no suceder. Es posible que una solución inicial que se considere “muy buena” pueda llevar la búsqueda a regiones donde las soluciones son muy desfavorables.

Normalmente a partir del conocimiento que se tiene del problema a resolver, se puede hacer la elección de una solución inicial factible. Cuando no se tiene una idea clara del problema, normalmente se opta por el uso de algoritmos que generen soluciones aleatorias factibles, ya que como se mencionó previamente, la condición inicial puede llevarnos tanto a buenas como malas soluciones.

En nuestro caso la estrategia para obtener la solución inicial es generarla en forma aleatoria, debido a que el problema que se va a resolver contiene no linealidades.

3. 3. 2 *Elección del entorno $N(s)$*

Para moverse hacia otras soluciones que mejoren el valor de la función objetivo, el algoritmo de la búsqueda tabú selecciona las mejores soluciones adyacentes al punto actual s en su entorno (o vecindad).

Se tiene, por tanto, que definir el concepto de solución cercana a s con el fin de poder hacer la selección de la solución dentro de dicho entorno.

Lo natural sería hacer la evaluación de cada uno de los posibles movimientos y quedarse con el mejor de ellos que no se encuentre en la lista tabú T , es decir, que no sea tabú (prohibidas), pero las soluciones tabú que resultaran en un mejor valor obtenido hasta el momento se perderían. Por tanto las soluciones tabú también se consideran como factibles en cada una de las iteraciones del método. En este punto entra un concepto, el cual se explicará a continuación, que se conoce como *criterio de aspiración*.

Un aspecto importante a considerar al elegir el entorno o vecindad $N(s)$, es su tamaño. Puede ser que el espacio adyacente a la solución actual sea muy grande y no sea adecuado evaluar todos los movimientos posibles. Existen algunos algoritmos que hacen una elección al azar de todos los posibles movimientos y evitan hacer la evaluación completa de la vecindad. El riesgo de omitir rutas de solución que lleven la búsqueda a óptimos globales está latente. Esta es una de las desventajas de hacer uso de esta elección aleatoria.

Se pueden elegir diferentes criterios para hacer la elección del entorno de búsqueda $N(s)$. En nuestro caso se eligió evaluar todos los posibles movimientos adyacentes a la solución actual.

3. 3. 3 *Tamaño de la lista tabú*

La lista tabú T se utiliza para evitar que la búsqueda se revierta, o se repitan ciertos movimientos (se incluyen en T). El objetivo de los movimientos prohibidos es hacer que la búsqueda pueda ir más allá de los óptimos locales. Sin estas restricciones, el método podría moverse a algún punto fuera del óptimo local, pero en la próxima iteración regresaría al punto visitado anteriormente al considerarse como mejor movimiento factible. Las restricciones tabú tienen como objetivo evitar que la búsqueda se cicle e inducir a que se sigan nuevas trayectorias de búsqueda [Glover y Laguna, 2001].

Es importante la elección del tamaño de la lista tabú y los atributos que en ella se han de almacenar. En la literatura algunos autores han considerado el valor de 7 como tamaño de la lista tabú sin explicación lógica [Song e Irving 2001]. No se encontró alguna forma en la cual obtener un tamaño de lista tabú "óptimo", o las consideraciones que se deben tomar para hacer la elección de éste. En este caso se puede sugerir, a través de la práctica, tomar este valor dependiendo del problema a resolver.

Se debe tener cuidado en este parámetro porque si el tamaño de la lista tabú es muy pequeño, y se tiene valles muy profundos en el espacio de búsqueda, el algoritmo se puede quedar atrapado en ellos.

En el caso opuesto, si la lista tabú es muy grande, se puede despreciar movimientos que pudieran orientar la búsqueda hacia soluciones óptimas o subóptimas.

3. 3. 4 Atributos a almacenar en la lista tabú

Almacenar una descripción completa de las últimas soluciones exploradas puede ocupar mucho tiempo y espacio en memoria. De ahí la importancia en los atributos que se deben considerar para ser guardados en la lista tabú.

Además, al querer revisar si un movimiento se encuentra dentro de la lista tabú, teniéndose muchos atributos a evaluar, llevaría demasiado tiempo, lo cual haría el proceso de búsqueda lento.

Como una alternativa, se puede almacenar algún atributo que represente al movimiento, por ejemplo, el movimiento realizado, la diferencia de costos entre movimientos, algún parámetro dentro de la función de costos, etc.

Cada uno de estos atributos, y la forma de almacenarlos, dependerán también del tipo de problema a resolver.

En nuestro caso se almacenan en la lista tabú el movimiento realizado y el costo de la función objetivo obtenido por ese movimiento.

3. 3. 5 Nivel de aspiración

Si bien la lista tabú se emplea para prohibir movimientos durante el proceso de búsqueda, los niveles de aspiración ayudan a liberar éstos movimientos cuando cumplen con ciertas características conocidas como *criterios de aspiración*.

El nivel de aspiración es un criterio que se emplea para aceptar movimientos que se consideran prohibidos y que, por tanto, se encuentran en la lista tabú [Glover y Laguna, 2001].

La elección del criterio o criterios de aspiración depende de las condiciones y necesidades del problema que se esté resolviendo.

Un posible criterio de aspiración sería la creación de una *función de aspiración de costo* [Glover y Laguna, 2001], de forma que sólo aquel movimiento tabú cuyo costo sea menor que el de esta función sea aceptado.

Para nuestro caso un criterio que se considera consiste en que cualquier movimiento tabú cuyo costo sea el mejor encontrado hasta ese momento durante la búsqueda sea aceptado. También se considera un criterio de aspiración por default [Revista enLinea 2005], en el cuál, si todos los movimientos posibles son clasificados como tabú, entonces el movimiento "menos tabú" se selecciona.

Dependiendo de los atributos almacenados en la lista tabú y la estructura del problema se pueden considerar varios criterios de aspiración.

3. 3. 6 Criterio de paro

Como criterio para finalizar la búsqueda, se puede establecer un número máximo de iteraciones. También se ha empleado el determinar un número máximo de iteraciones sin que se mejore del costo de la función de costos.

En la mayoría de los casos se considera el primer criterio y es el empleado en este trabajo.

3. 3. 7 Intensificación y diversificación

En la técnica de la búsqueda tabú se tienen estrategias de mejora de la búsqueda, éstas son: la Intensificación y Diversificación [Glover 1990].

La estrategia de Intensificación consiste en elegir una o más de las mejores soluciones visitadas durante el proceso de búsqueda, y reiniciar la búsqueda partiendo desde allí. A éstas soluciones se les conoce como *soluciones elite* [Glover y Laguna, 2001]. No existe una metodología para determinar el número adecuado de soluciones elite para la estrategia de intensificación. Algunos autores obtienen ese número observando el comportamiento del algoritmo con el problema que están resolviendo.

Si el problema a resolver es de grandes dimensiones, el espacio de soluciones también lo es. Por tanto, resulta impráctico hacer una revisión exhaustiva del espacio de soluciones y elegir muchas soluciones elite.

Por otro lado, la estrategia de diversificación se encarga de orientar la búsqueda hacia nuevas regiones dentro del espacio de soluciones [Glover y Laguna, 2001]; regiones que no han sido exploradas y que pueden contener la solución óptima o muy buenas soluciones.

Ambas estrategias tienen el objetivo de orientar la búsqueda hacia el óptimo global.

3. 4 Crear una lista de soluciones factibles

Para crear la lista de soluciones factibles, primeramente, se define el tamaño de la vecindad $N(s)$ que se va a considerar para el problema. Este parámetro va incluido en las condiciones iniciales del programa.

En la vecindad de un punto solución s , pueden existir tanto soluciones factibles como no factibles. Para determinar cuáles son factibles y cuáles no, se hace la evaluación de toda la vecindad (todos los posibles movimientos) y se descartan aquellas soluciones que no cumplan con las restricciones del problema.

Con el fin de no emplear demasiada memoria si la vecindad es muy grande, se pueden almacenar solamente las mejores soluciones y desechar las demás. En algunos casos se afecta por un factor la solución actual, y sólo aquellas soluciones que mejoren este valor son aceptadas. Lamentablemente esto no es muy práctico porque si la búsqueda se encuentra en una región que no cumpla este criterio, se puede detener.

3. 5 Elección del mejor movimiento factible

Un paso importante para la orientación de la búsqueda es la elección del mejor movimiento factible desde un punto cualquiera. La figura 3.2, ilustra este mecanismo.

Primeramente, se obtiene una lista ordenada de los movimientos factibles en la vecindad de la solución actual como se explicó anteriormente.

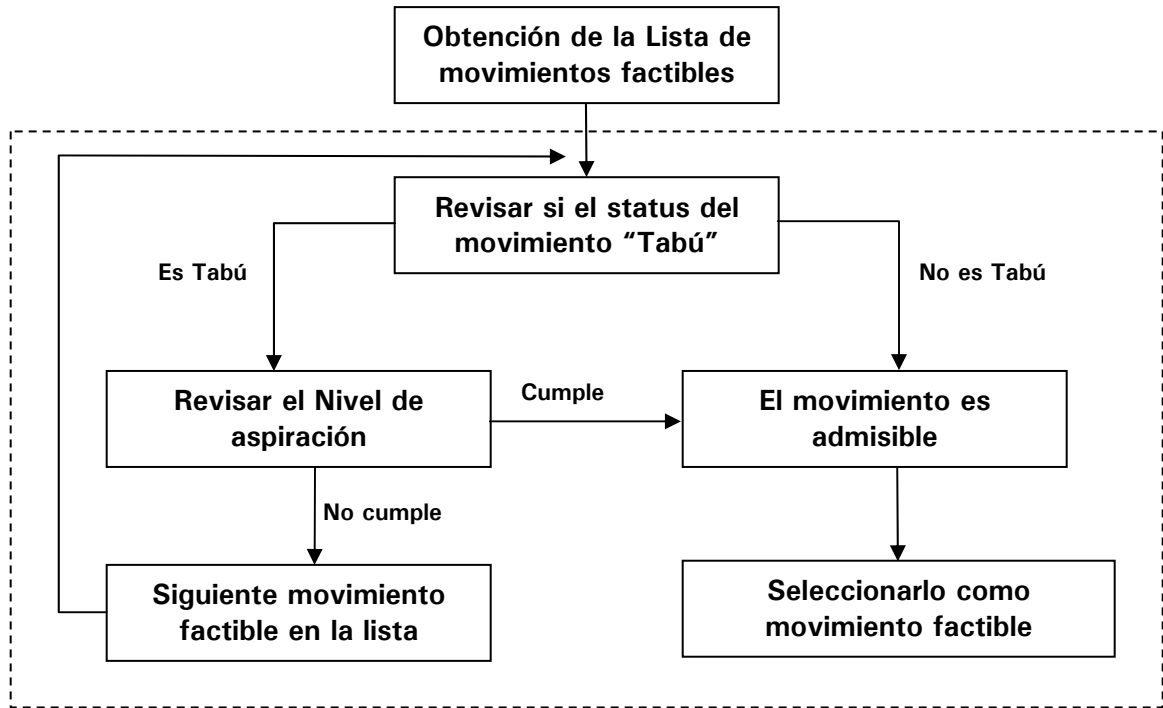


Figura 3.2. Elección del mejor movimiento.

A continuación, se selecciona el primer movimiento de la lista y se revisa si esta en la lista tabú; es decir, si el movimiento está prohibido para la presente iteración.

Si el movimiento es tabú, se revisa cada uno de los criterios de aspiración que se hayan considerado. Si cumple con alguno de ellos, el movimiento es admisible. En caso contrario, se revisa el siguiente movimiento de la lista y se repite el proceso de selección hasta que se encuentre algún movimiento factible que se pueda realizar. En caso de que la búsqueda se encuentre en un lugar donde no hay movimientos factibles, se puede realizar desde este punto alguna transferencia hacia la estrategia de diversificación y continuar la búsqueda en otra región del espacio de soluciones.

Ahora bien, si el movimiento de la lista no esta prohibido se puede seleccionar a sabiendas que es el mejor movimiento de la lista, dado el ordenamiento de la lista. Por tanto este movimiento será seleccionado como admisible y será el mejor movimiento factible en la vecindad actual.

En algunos casos, cuando las restricciones tabú y los criterios de aspiración son muy limitantes, es posible que ninguno de los movimientos factibles pueda calificar como admisible. Para estas situaciones se puede elegir el movimiento “menos inadmisibles” que se escogerá, sólo si no hay ninguna alternativa admisible disponible. Este movimiento puede entenderse como un retroceso en el proceso de búsqueda al no mejorar la solución, pero en algún momento puede llevar a mejores soluciones dentro del espacio de búsqueda.

3. 6 Estrategia de oscilación

Cuando el proceso de búsqueda llega a tocar una frontera del espacio de soluciones, el método puede detenerse debido a que no existan soluciones factibles cercanas. En vez de parar, la estrategia de oscilación se encarga de extender la vecindad o el criterio de selección de movimientos se modifica, para permitir que la búsqueda pueda cruzar esa frontera [Glover y Laguna, 2001]. Se puede imaginar el espacio de soluciones como en la figura 3.3, donde se tienen delimitadas las regiones que son factibles y aquellas que no lo son.

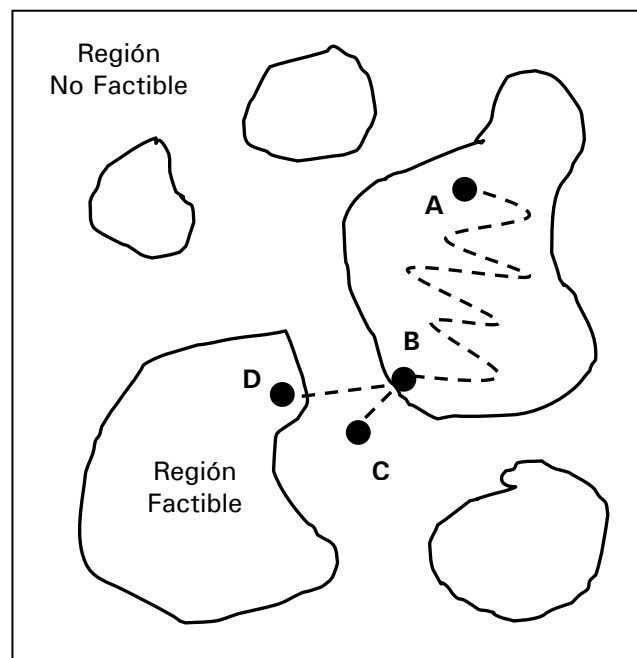


Figura 3.3. Espacio de solución y evolución de la búsqueda.

El proceso normal de búsqueda local comenzaría en el punto A. Suponiendo que la búsqueda en esa región del espacio de soluciones nos llevara al punto B, donde se encuentra el límite de la región factible, el método regresaría a algún otro punto dentro de la misma región.

Sin embargo la estrategia de oscilación permite que ese límite sea cruzado. Partiendo del punto frontera se interna dentro de la región no factible considerando cierta profundidad y si no encuentra un punto factible (punto C), regresa al punto anterior. En este punto la frontera nuevamente se cruza, esta vez desde la dirección opuesta procediendo a un nuevo punto (podría ser el punto D).

El proceso de aproximar y cruzar repetidamente la frontera desde diferentes direcciones crea una forma de oscilación que da el nombre a la estrategia [Revista enLinea 2005]. El control sobre esta oscilación se establece mediante la generación de evaluaciones y reglas de movimiento modificadas, dependiendo de la región en la cual se está dirigiendo la búsqueda. En muchos casos el espacio de soluciones tiene forma de islas, como en la figura 3.3, lo cual hace muy útil esta estrategia.

3. 7 Uso de memoria a corto plazo

Las estructuras de memoria en la búsqueda tabú operan en base a cuatro principios del movimiento: calidad, influencia, ser reciente y frecuencia (Figura 3.4) [Glover y Laguna, 2001].

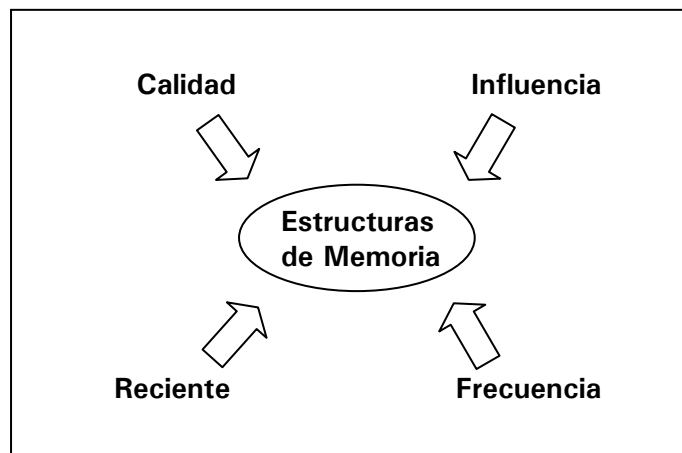


Figura 3.4. Las cuatro dimensiones de la búsqueda tabú.

La dimensión de la *Calidad* se refiere a la habilidad de diferenciar el mérito (o categoría) de las soluciones visitadas durante la búsqueda [Glover y Laguna, 2001]. En este contexto, la memoria se puede emplear para identificar elementos que tienen en común “buenas” soluciones o rutas que llevan a tales soluciones. La Calidad se basa en lo atractivo de las soluciones visitadas. Incentivando tales soluciones o rutas se pueden reforzar las acciones que ayuden a alcanzarlas o bien, si las soluciones son malas, penalizarlas para evitar llegar a ellas. La flexibilidad de estas estructuras de memoria, permiten que la búsqueda sea guiada en un ambiente multi-objetivo, donde la bondad de una dirección particular de búsqueda puede ser determinada por más de una función.

La memoria basada en si el movimiento es *Reciente*, es muy empleada en lo que se refiere a la memoria de corto plazo. Esta memoria almacena la huella de los atributos de los elementos que han sido visitados en el pasado más próximo [Glover y Laguna, 2001]. Este tipo de memoria incluye la historia más reciente de la búsqueda.

Al emplear esta memoria, los atributos seleccionados que se presentan en las soluciones visitadas son etiquetados como *Tabú*, y las soluciones etiquetadas que contienen elementos tabú, se convierten completamente en elementos Tabú. Esto previene que las soluciones visitadas recientemente se vuelvan a visitar.

La memoria basa en la *Frecuencia* proporciona información adicional que complementa la información basada en lo reciente, ampliando la base para la selección de movimientos durante el proceso de búsqueda [Glover y Laguna, 2001]. La frecuencia representa el número ocasiones que un movimiento ha sido realizado. La frecuencia se puede combinar con las dos dimensiones mencionadas anteriormente, tomando en cuenta tanto la calidad como lo reciente de las soluciones visitadas, penalizándolas o incentivándolas para modificar los movimientos futuros.

La memoria basada en la frecuencia es frecuentemente considerada dentro del contexto de memoria de corto plazo. Pero también se puede considerar dentro de la memoria de largo plazo, dependiendo de la utilización que se haga de ella.

La cuarta dimensión, la *Influencia*, considera el impacto de las elecciones hechas durante la búsqueda, no solamente en calidad sino también en estructura. Almacenando información acerca de las influencias de movimientos realizados o soluciones visitadas sobre el proceso de búsqueda, se tiene un cierto nivel de aprendizaje [Glover y Laguna, 2001]. La valoración y la explotación de la influencia mediante una memoria más flexible es una característica importante de la búsqueda tabú.

3. 8 Uso de memoria de mediano y largo plazo

Como se ha mencionado, el método de la búsqueda tabú comienza con una solución inicial factible y en el proceso de búsqueda se van guiando la búsqueda hacia la mejor solución posible, hasta que el criterio de paro se cumple.

En la búsqueda, el “mejor” movimiento factible que se realiza en cada iteración es aquel con el menor valor de la función objetivo. Esta estrategia por si sola, no garantiza que el movimiento seleccionado permita realizar la búsqueda en la dirección de la solución óptima. Debido a esto, se requiere de las estrategias de mediano y largo plazo que se mencionaron en secciones pasadas: Intensificación y Diversificación.

La estrategia de Intensificación, como se mencionó anteriormente, opera para registrar y comparar las características de las mejores soluciones generadas durante un periodo particular del proceso de búsqueda. Es decir, partiendo del historial generado por la búsqueda, las mejores soluciones visitadas durante el proceso son almacenadas. La estrategia de intensificación se encargará de reiniciar la búsqueda desde alguna de éstas regiones para buscar más profundamente en ellas por mejores soluciones.

La figura 3.5 muestra la evolución del proceso de búsqueda partiendo del punto A al punto C. Durante la búsqueda se encontraron dos soluciones muy buenas en los puntos B y C, los cuales son almacenados. Estos puntos serán empleados para reiniciar nuevas búsquedas intentando encontrar mejores soluciones en los vecinos.

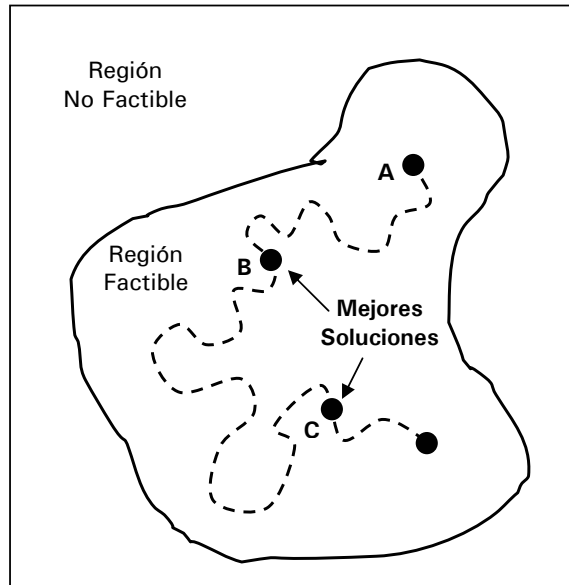


Figura 3.5. Estrategia de intensificación.

La memoria de Largo Plazo utiliza principios que son inversos a los de la memoria de mediano plazo [Revista enLinea 2005]. Este tipo de memoria produce puntos iniciales de búsqueda en nuevas regiones, ver figura 3.6.

En la figura se observa la estrategia de diversificación, donde los puntos A y B, corresponden al proceso de búsqueda en una región factible del espacio de solución.

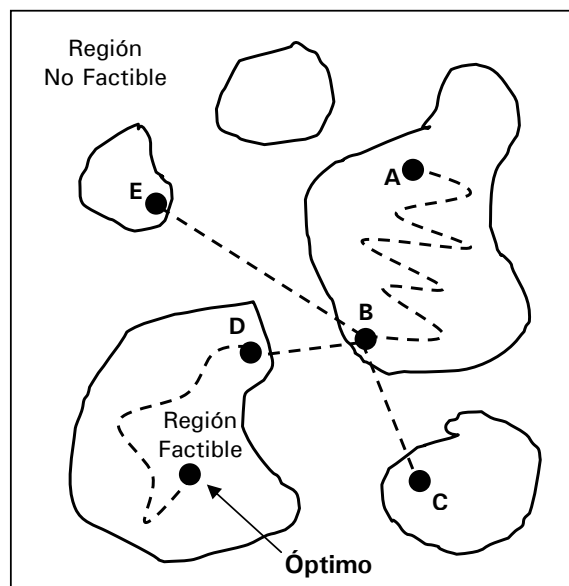


Figura 3.6. Estrategia de diversificación.

En los puntos de $B \rightarrow C$, $B \rightarrow D$ y $B \rightarrow E$, corresponden a las distintas diversificaciones que se hacen durante la búsqueda. Partiendo de C, E y D se inician otros procesos de búsqueda en las nuevas regiones factibles encontradas.

Con ambas estrategias, lo que se intenta es explorar el mayor cantidad de espacio dentro de la región factible de soluciones y encontrar el óptimo global.

3. 9 Problema de las N-Reinas

Para mostrar el funcionamiento de la búsqueda tabú, se considera un problema combinatorio con estructura simple como ejemplo. Se trata del problema de las N-reinas el cual es un problema clásico dentro del área de la Inteligencia Artificial que ha sido empleado como patrón para la prueba de estrategias de búsqueda [Laguna M. 1994].

En palabras simples, el problema de la N-reinas consiste en colocar N reinas en un tablero de ajedrez de tamaño NxN de tal forma que no se ataquen entre sí. Así, dos reinas no pueden estar en la misma fila, la misma columna o la misma diagonal. Si dos reinas están ubicadas de forma que una de ellas pueda atacar a la otra, se dice que un “ataque” ha ocurrido. Por tanto la idea del problema de optimización, es lograr que el número de ataques sea minimizado. Obviamente la solución óptima es encontrar la configuración que reduzca el número de ataques a cero.

Matemáticamente, el problema consiste en:

$$\min \sum T_i \quad 3.1$$

donde:

T_i representa un ataque.

Sujeto a:

- Dos reinas no pueden estar en la misma fila.
- Dos reinas no pueden estar en la misma columna.
- Dos reinas no pueden estar en la misma diagonal.

Así por ejemplo, en la figura 3.7, se muestra un tablero de ajedrez con siete reinas representadas por las "X's", en donde se tienen 4 ataques: la reina en (1,4) con la reina en (2,5); la reina en (2,5) con la reina en (6,1); la reina en (6,1) con la reina en (7,2); y la reina en (4,6) con la reina en (5,7).

	1	2	3	4	5	6	7
1				x			
2					x		
3			x				
4						x	
5							x
6	x						
7		x					

Figura 3.7. Tablero de ajedrez con 7 reinas y cuatro "ataques".

El problema se trata pues, de mover las reinas de manera que ninguna de ellas ataque a las demás.

Para este problema, se considera la condición inicial mostrada en la figura 3.7, la cual se representa por medio de una lista mostrada en la figura 3.8, la cuál indica la posición de cada reina en el tablero.

Fila (reinas)	1	2	3	4	5	6	7
Columna	4	5	3	6	7	1	2

Figura 3.8. Permutación inicial.

Este es un problema de permutaciones en el cual el intercambio de elementos es empleado con frecuencia. Estos movimientos nos llevan de un punto solución a otro, y a este intercambio se le puede llamar *operación*. En la figura 3.9 se muestra como se realiza una operación, en donde se intercambian dos reinas de posición. Por lo cual, la vecindad $N(s)$ para una solución dada s consiste de 21 soluciones adyacentes que se puede obtener intercambiando elementos.

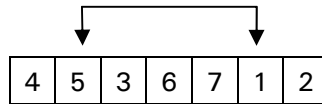


Figura 3.9. Intercambio entre las Reinas 2 y 6.

La consecuencia del intercambio realizado es que el valor de la función objetivo cambie. Los valores de los intercambios normalmente dan la base para determinar la calidad de los movimientos, aunque se debe considerar que la historia de la búsqueda juega el papel más importante dentro de la técnica tabú. La clasificación de los movimientos como prohibidos (lista tabú), así como los atributos de frecuencia y si el movimiento es reciente, determinaran si un movimiento debe o no realizarse.

Para este ejemplo del problema con 7 reinas se considera una lista tabú de tamaño 3, es decir, el movimiento que sea realizado permanecerá como prohibido durante 3 iteraciones y después será "liberado" y podrá realizarse.

Dada la estructura mostrada en las figuras 3.8 y 3.9, el intercambio de las reinas 2 y 6 es equivalente al intercambio de las reinas 6 y 2, y pueden representarse por el par (2, 6). Por tanto, la estructura empleada para la lista tabú puede ser la mostrada en la figura 3.10.

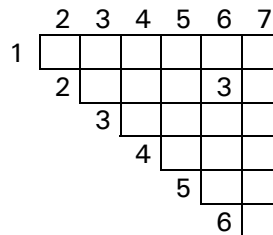


Figura 3.10. Estructura usada para la lista tabú.

Cada elemento de la estructura contiene un número de iteraciones en el que el movimiento permanecerá prohibido. Este número se decrementa en cada iteración. Si se realizó el intercambio (2, 6), el movimiento será prohibido durante las siguientes

tres iteraciones. Desde luego que si el movimiento siendo tabú mejora cualquier solución obtenida hasta el momento, los criterios de aspiración eliminarán el atributo prohibido y le movimiento se podrá realizar.

El proceso de búsqueda para este problema considerando 7 reinas, se desarrolla a continuación.

Se parte de la solución inicial en la que se tienen 4 ataques y la estructura tabú está inicialmente vacía (llena de ceros). En la figura 3.11 se muestran el tablero de ajedrez, la estructura tabú y los mejores 5 intercambios que se pueden realizar en la presente iteración, donde, si el valor del intercambio es positivo el movimiento agrega el número de ataques que correspondan al valor y si es negativo los reduce en la porción que se indique.

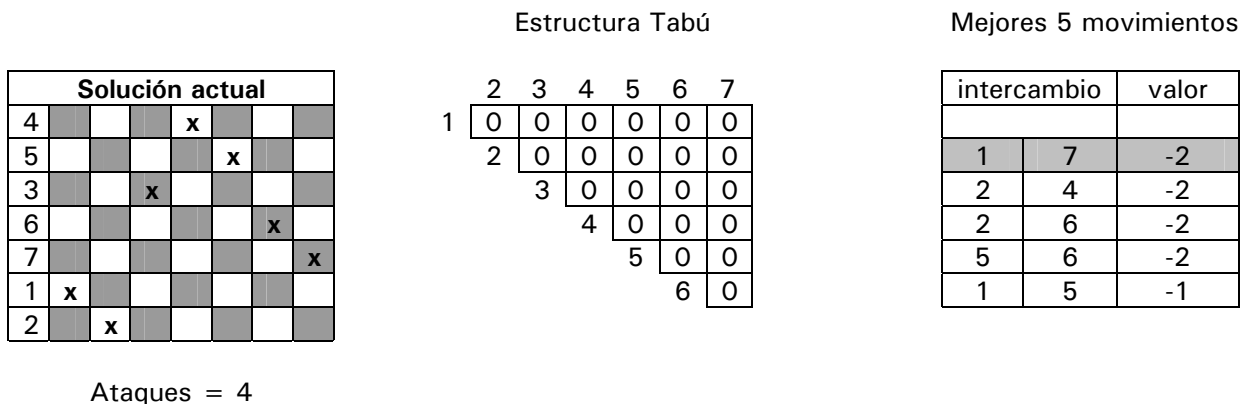


Figura 3.11. Iteración 0, para el problema de 7-reinas.

Para obtener los mejores movimientos se evalúan todos los movimientos posibles en la vecindad actual y de ellos se eligen los mejores, es decir, los que más disminuyan el número de ataques o los que menos los incrementen. Esta lista se ordena para hacer más fácil el proceso de selección de movimientos.

En esta iteración se elige el intercambio de las reinas en las filas 1 y 7, ya que es el mejor de la lista, en la figura 3.11 se marca con gris. Nótese que la elección es arbitraria debido a que los intercambios de las reinas en las filas 2 y 4, 2 y 6, o 5 y 6,

producen la misma mejora en el número de ataques. En este caso la regla de elección es arbitraria, se elige el primer movimiento encontrado en la lista.

En la figura 3.12, se muestra el punto en que se encuentra la búsqueda actualmente y en la que se tienen 2 ataques. Dado que el movimiento de las reinas en 1 y 7 fue realizado, se incluyó en la lista tabú y se marcó con un 3 en la estructura de la lista tabú. Este movimiento permanece en la lista tabú y está prohibido durante las siguientes tres iteraciones.

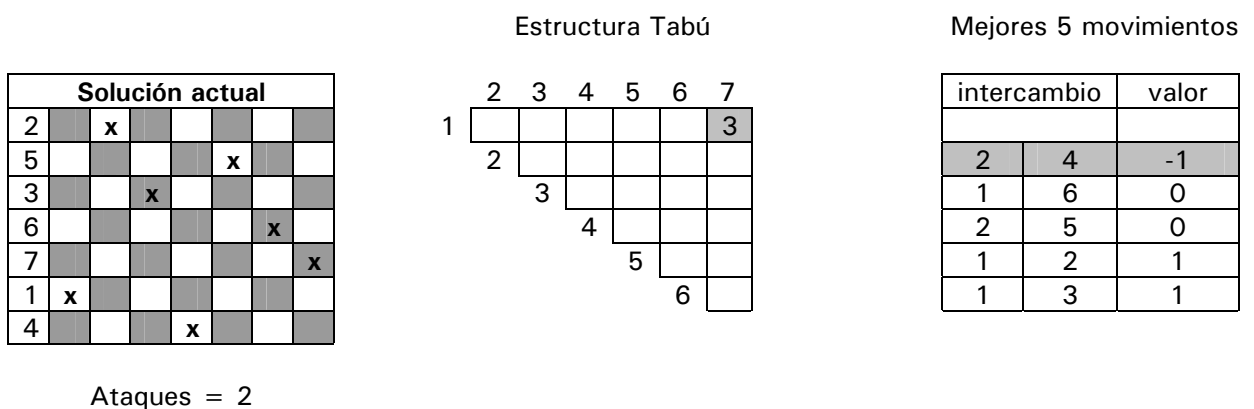


Figura 3.12. Iteración 1, problema de 7-reinas.

Después de obtener los posibles movimientos desde el punto actual, el movimiento que mejora el número de ataques en esta iteración es el intercambio de las reinas en 2 y 4 reduciendo en 1 el número de ataques. Nótese que realizando los intercambios de las reinas 1 y 6 y 2 y 5 la configuración se modifica, pero no disminuye el número de ataques.

Hasta este momento, la mejor solución obtenida es la mostrada en la figura 3.13, en la cual se tiene sólo un ataque. En la lista de movimientos obtenida para esta iteración dos intercambios están en la lista tabú y se marcan con una **T** para identificarlos con mayor facilidad. A pesar de ello, no son los mejores movimientos de la lista, así que no se toman en consideración por el momento.

Aunque el primer movimiento en la lista no disminuye el número de ataques es el mejor movimiento elegible ya que tampoco incrementa los ataques. Por tanto el intercambio de las reinas en 1 y 3, se realiza.

En algunas implementaciones de la búsqueda tabú, en que en el vecindario se tienen demasiados movimientos que son cero, algunos investigadores han encontrado conveniente prohibir la selección de movimientos que no mejoren ni empeoren el valor de la función objetivo [Laguna M. 1994]. Así, considerando lo anterior, en este caso el movimiento que se hubiera elegido sería el movimiento de las reinas en 4 y 5, ya que los movimientos anteriores a él están clasificados como tabú.

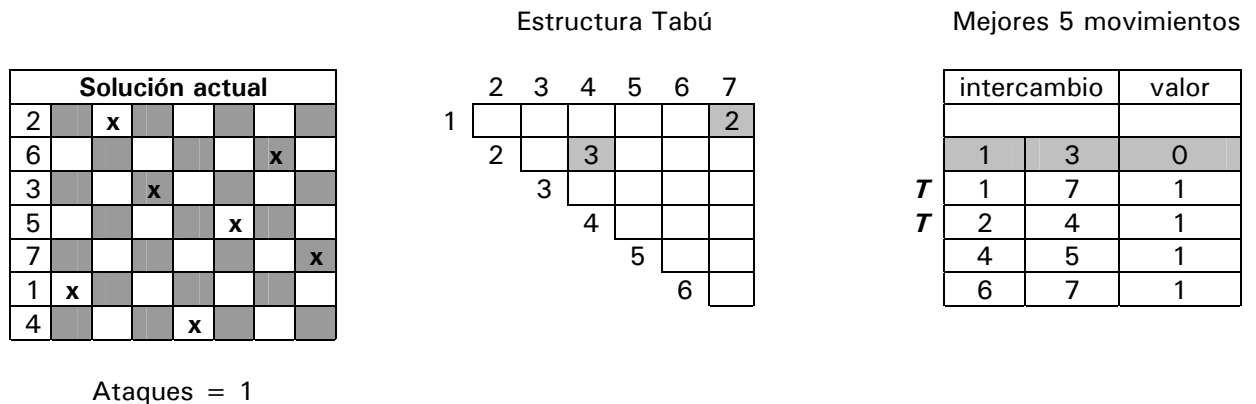


Figura 3.13. Iteración 2, problema de 7-reinas.

Obsérvese en la estructura de la lista tabú de la figura 3.13, que el intercambio de las reinas en 1 y 7 marcado en la iteración anterior con un 3 se ha decrementado a 2, indicando que el intercambio será prohibido durante dos iteraciones más.

En el siguiente punto solución mostrado en la figura 3.14, el número de ataques se mantiene igual que en el punto anterior.

Ahora, la lista tabú indica tres movimientos prohibidos, los de las reinas 1 y 3, 1 y 7 y 2 y 4.

En la lista de movimientos se observa que los movimientos de las reinas en 1 y 3, y las reinas en 1 y 7 no mejoran los ataques y además están prohibidos en la iteración actual. Ninguno de estos movimientos, por tanto, debe ser elegido. El

movimiento más atractivo en este caso es el intercambio de las reinas 5 y 7, lo que lamentablemente incrementa el número de ataques.

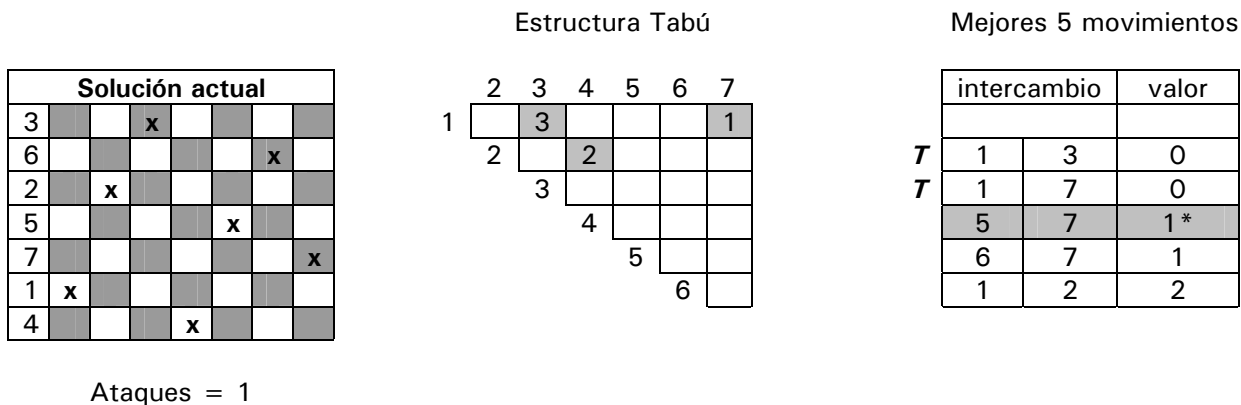


Figura 3.14. Iteración 3, problema de 7-reinas.

El movimiento realizado previamente incrementa el número de ataques, como se muestra en la figura 3.15 para la iteración 4. Al realizar este movimiento e incrementar el número de ataques, el método está escapando de un mínimo local, representado por 1 ataque, y la búsqueda es orientada hacia otra región dentro del espacio de soluciones.

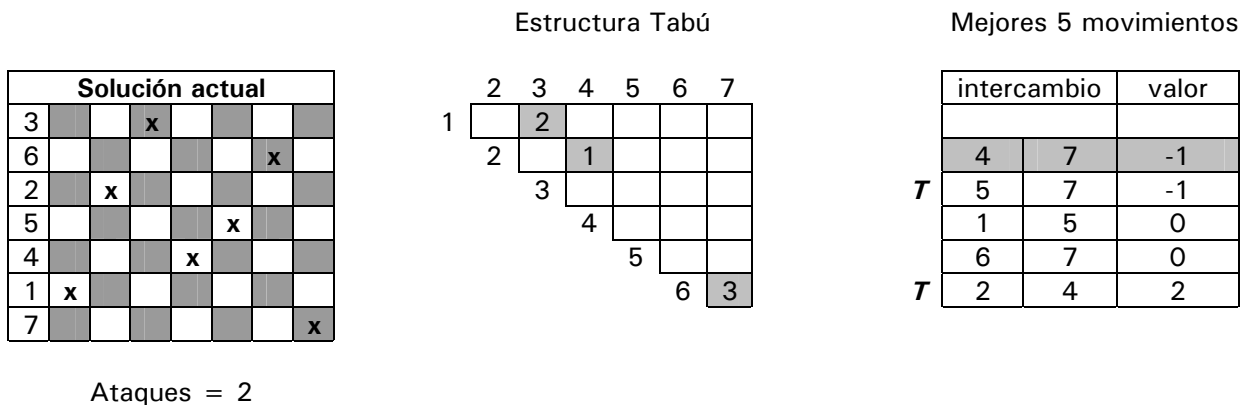


Figura 3.15. Iteración 4, problema de 7-reinas.

En la iteración 4, el movimiento que se elige el intercambio de las reinas en 4 y 7 que no está prohibido y el número de ataques se reduce a 1. El movimiento de intercambio de las reinas en 5 y 7 no se considera porque está prohibido.

En la figura 3.16, la situación en la que se encuentra la búsqueda para la iteración 5 es similar a la presentada en la iteración 3 en la que el mejor movimiento de la lista era prohibido. Solamente que ahora este movimiento reduce el número de ataques a cero, el menor valor obtenido durante todo el proceso de búsqueda.

Al estar prohibido este movimiento, se hace uso del criterio de aspiración, en el que se libera la prohibición de un movimiento, si éste reduce el número de ataques de manera que sea el mejor valor obtenido hasta ese momento durante el proceso de búsqueda. Dado que es así, la prohibición de este movimiento es eliminada y el movimiento es realizado.

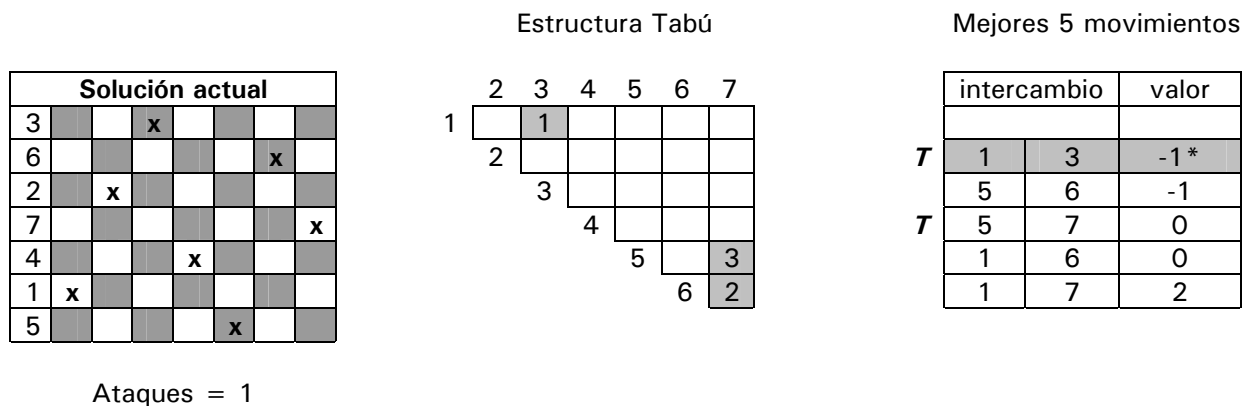


Figura 3.16. Iteración 5, problema de 7-reinas.

En este momento la búsqueda puede detenerse, debido a que conocemos de antemano el valor mínimo que se desea obtener para este problema.

La nueva solución representa una configuración óptima sin ataques y se muestra en la figura 3.17.

Solución actual						
2		x				
6						x
3			x			
7						x
4				x		
1	x					
5					x	

Figura 3.17. Solución óptima para el problema de 7-reinas.

3. 10 Árbol de expansión mínima

El problema del árbol de expansión mínima (AEM) es un problema de optimización combinatoria y está considerado dentro del conjunto de problemas definidos como *NP-Duros*.

La formulación del AEM ha sido la base para encontrar soluciones a diferentes aplicaciones en diversas áreas: Transporte y diseño de redes, por mencionar algunas.

Dada la complejidad del AEM se han desarrollado diferentes técnicas para encontrar muy buenas soluciones en tiempos que sean aceptables. Existen varias técnicas convencionales, todas ellas determinísticas, como Prim, Dijkstra, Kruskal, que son algoritmos de tiempo polinomial en la búsqueda de la solución del problema. Debido a esta característica, cuando el problema en cuestión crece, el tiempo computacional crece considerablemente, llegando a un momento en que se vuelve impráctico emplear alguna de éstas técnicas.

En el problema del AEM, la búsqueda tabú (y otras heurísticas) han mostrado su capacidad para dar una buena solución empleando un tiempo computacional considerablemente menor al que cualquiera de las técnicas convencionales emplea. A continuación se describe el problema del AEM.

Un *Árbol* es una red conectada que puede incluir sólo un subconjunto de todos los nodos de la red, mientras que un *Árbol de Expansión* une todos los nodos de la red, sin permitir ningún lazo o trayectoria cerrada (figura 3.18) [Taha, 1998].

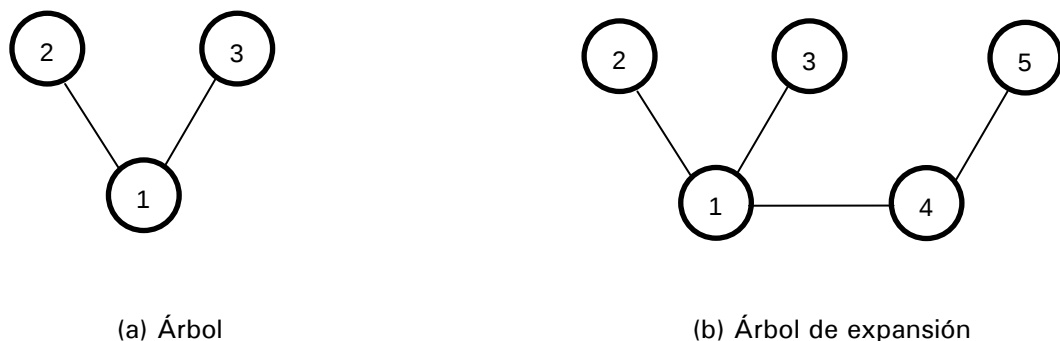


Figura 3.18. Redes conectadas tipo árbol.

Considérese un grafo conectado y no dirigido:

$$G = (V, E) \quad 3.2$$

Donde:

$V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ Es un conjunto de vértices que representan los nodos en una red.

$E = \{e_{ij} \mid e_{ij} = (v_i, v_j), v_i, v_j \in V\}$ Es un conjunto de aristas que representan conexiones entre dos nodos cualesquiera.

Cada arista tiene un peso asociado que se denota por:

$W = \{w_{ij} \mid w_{ij} = w(v_i, v_j), w_{ij} > 0, v_i, v_j \in V\}$, el cual puede representar distancia, costo, etc.

El Árbol de Expansión es un conjunto mínimo de aristas de E que conecta todos los nodos de V . Al menos un árbol de expansión puede ser encontrado en un Grafo G [Campos y Rahn 1999].

El AEM denotado por C es un árbol de expansión cuyo peso o costo total de todos los enlaces, C^* , es mínimo. Es decir:

$$C^* = \min_t \sum_{e_{ij} \in C} w_{ij} \quad 3.3$$

El cual debe cumplir con las siguientes restricciones para que la estructura se pueda considerar un Árbol de Expansión:

- a) Ser un subgrafo de G conectado con $n-1$ enlaces.
- b) Ser un subgrafo de G sin ciclos con $n-1$ enlaces.

Con el fin de mostrar el desempeño de la búsqueda tabú y compararlo con algún algoritmo convencional, se considera el gráfico no dirigido de la figura 3.19.

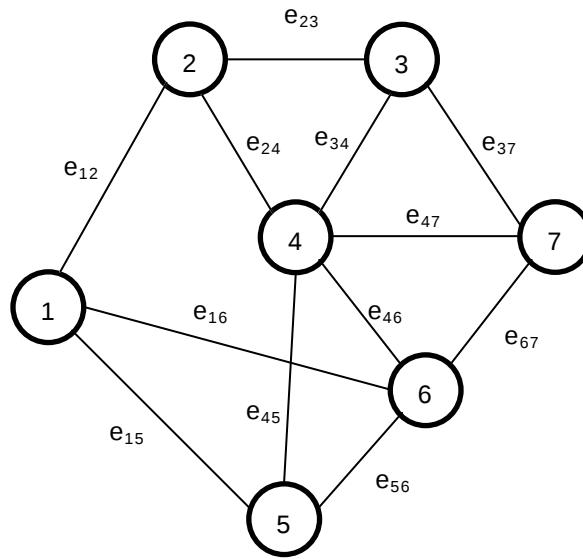


Figura 3.19. Gráfico no dirigido.

Cuya matriz de conectividad es:

Enlace	e_{12}	e_{15}	e_{16}	e_{23}	e_{24}	e_{34}	e_{37}	e_{45}	e_{46}	e_{47}	e_{56}	e_{67}
Envío(v_i)	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	5	6
Recepción(v_j)	2	5	6	3	4	4	7	5	6	7	6	7
Peso (w_{ij})	8	5	12	4	2	3	7	6	6	5	4	1

Para este problema:

- La vecindad que se considera es la compuesta por todas las soluciones adyacentes a la actual.
- El tamaño de la lista tabú es de 3 elementos, guardándose en la lista el movimiento realizado.
- Se libera un movimiento prohibido sólo si la solución a que lleve este movimiento es mejor que todas las soluciones encontradas hasta ese momento.
- El criterio de paro son 10 iteraciones.

El AEM resultante de la búsqueda es el mostrado en la figura 3.20, el cuál se obtuvo en la iteración 3 del método de la búsqueda tabú.

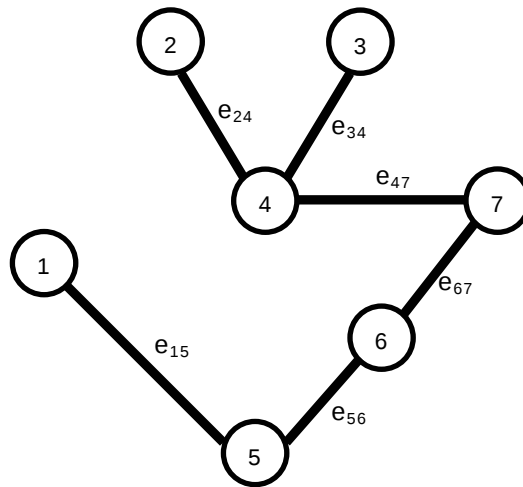


Figura 3.20. AEM encontrado con la búsqueda tabú.

Cuyo valor de la Función Objetivo es:

$$C^* = 20$$

Un método determinístico empleando para obtener el AEM es el método de Prim [Taha 1998]. Aplicando este método a la red de la figura 3.19, se obtiene un resultado idéntico al obtenido con la búsqueda tabú.

Comenzando en el nodo 1, la secuencia en la que se eligen los demás nodos conectados al árbol es $1 \Rightarrow 5 \Rightarrow 6 \Rightarrow 7 \Rightarrow 2 \Rightarrow 3 \Rightarrow 4$ y el valor de la función objetivo es de 20.

Para el método de Prim el tiempo empleado fue menor a 0.1 seg., al igual que para el mismo problema usando la búsqueda tabú. No se notó mucha diferencia en los tiempos para ambos métodos.

3. 11 Conclusiones

En este capítulo se presentó la técnica de la búsqueda tabú y algunas aplicaciones a problemas de optimización combinatoria.

El primero de ellos, el problema de las N-reinas, es un problema típico de la inteligencia artificial que a simple vista parece simple de resolver. Sin embargo, el problema se complica al intentar encontrar la función objetivo que represente el problema. En este caso se trata de una función con múltiples soluciones las cuales son óptimas. Empleando la búsqueda tabú se observó que la solución obtenida es óptima empleando un número de iteraciones reducido.

En el segundo caso, el ejemplo presentado no denota mucha diferencia entre emplear un método determinístico o un método heurístico, aún cuando la solución encontrada con la búsqueda tabú es óptima, debido a que el problema es de pequeñas dimensiones. En un problema de mayores dimensiones, con una técnica convencional el proceso de búsqueda aumentaría en forma polinomial, mientras que con la búsqueda tabú, al emplear diferentes estrategias de búsqueda, el tiempo empleado en la búsqueda se reduce.

Capítulo 4

Búsqueda tabú Aplicada al Problema de Localización de Capacitores en SED

4.1 Introducción

En esta sección se presenta la aplicación de la técnica de la búsqueda tabú al problema específico de localización de capacitores en sistemas eléctricos de distribución.

Como se mencionó en el capítulo 2, el problema consiste en obtener el número de capacitores, sus capacidades y la localización óptima de ellos en la red de distribución, que ayuden a mejorar las características de la red.

La función de costos para el problema de localización de capacitores, como se recordará, es:

$$\min F \quad \text{donde} \quad F = K_p P_{T,loss} + \sum_{i=1}^n C_i^c \quad (4.1)$$

Sujeta a:

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (4.2)$$

Donde:

K_p es el costo anual por unidad de pérdidas de energía, \$/(kW-año).

$P_{T,loss}$ se obtiene de resolver el problema de flujos de potencia y está dado por la potencia de generación menos la potencia demandada por las cargas:

$$P_{T,loss} = P_G - P_D \quad (4.3)$$

C_i^c es el costo asociado al capacitor de capacidad c conectado en el nodo i .

n es el número de capacitores instalados en la red de distribución.

4. 2 Funcionamiento del programa de búsqueda tabú

El diagrama de flujo del programa desarrollado se muestra en la figura 4.1.

Primeramente se hace la lectura de datos, las condiciones iniciales y algunos parámetros tales, como el tamaño de la lista tabú, número de iteraciones de la búsqueda, los parámetros de la diversificación e intensificación, etc.

En el siguiente paso, se genera una solución inicial que sea factible. Para este problema solución inicial se genera de forma aleatoria, se eligen tanto el número de capacitores como su localización inicial en forma aleatoria. Después se calculan los flujos de potencia para determinar si la solución generada cumple con las restricciones del problema. Si es así, la solución se acepta. En el caso contrario se vuelve a generar otra solución hasta que se encuentre una solución factible de la cual se pueda continuar.

Después en toda la vecindad de la solución actual, se hace el análisis de flujos de potencia para ver los cambios en las pérdidas de cada uno de los vecinos. Se genera una lista con los movimientos que mejoran el valor de la función objetivo (minimizan en este caso). En esta lista se ordenan los movimientos para facilitar su selección. Los movimientos que llevan a soluciones que no son factibles se desechan.

Las restricciones que se consideran para que una solución no sea factible son:

- En un mismo nodo de la red no puede haber más de un banco de capacitores conectado.
- Los niveles de voltaje máximos y mínimos deben satisfacerse.
- Las condiciones de balance de potencia (del programa de flujos de potencia) deben cumplirse.

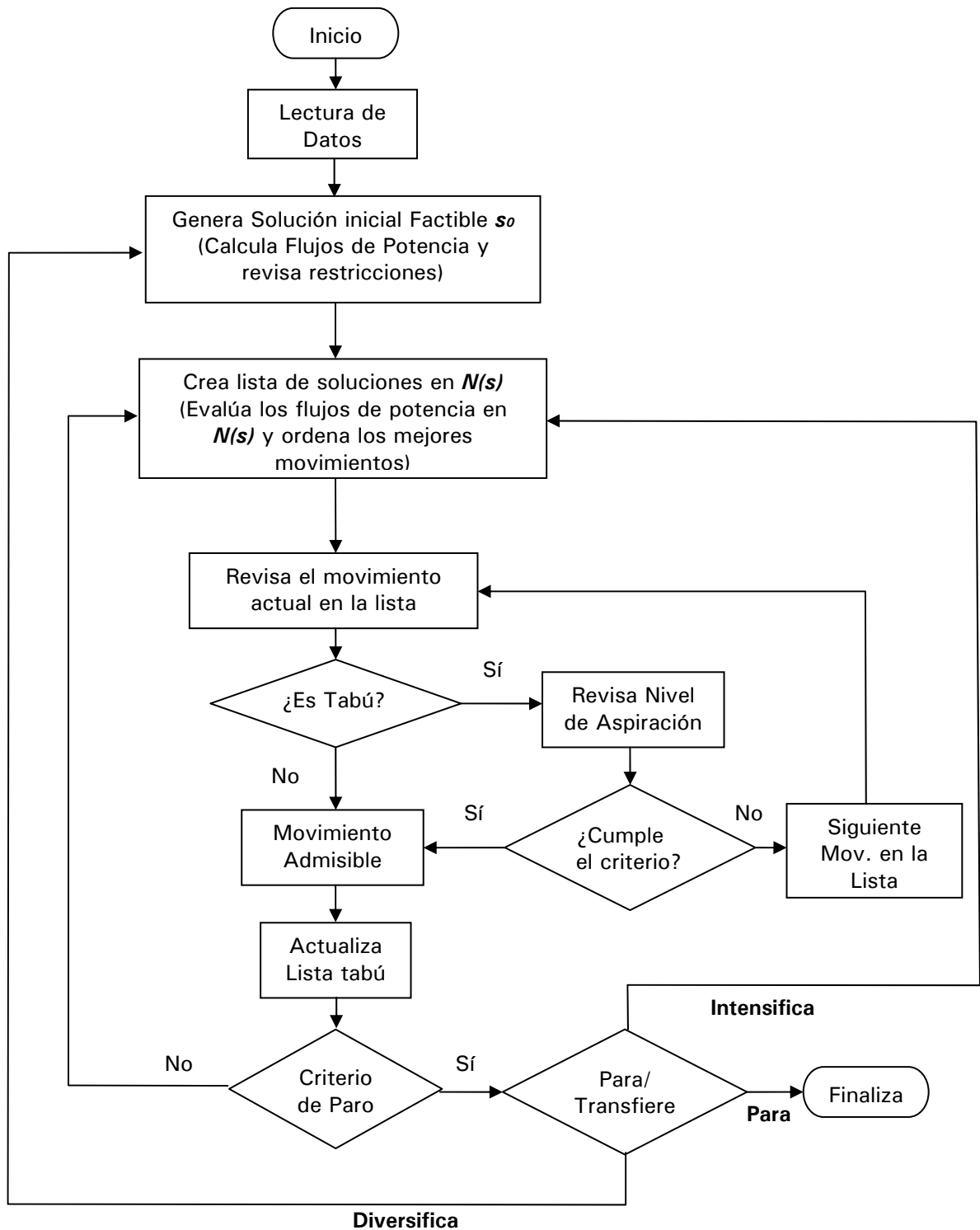


Figura 4.1. Diagrama de flujo del programa de localización de capacitores usando búsqueda tabú.

Posteriormente a la elección de un movimiento, se revisa si éste está en la lista tabú o no, es decir, si está prohibido o no para la iteración actual. Si el movimiento no es tabú, puede ser realizado.

Si el movimiento es tabú se revisa si cumple con el criterio de aspiración. En este caso, el criterio es: “el movimiento tabú dejará de serlo si lleva la búsqueda a una mejor solución que la mejor solución encontrada hasta ese momento”. Si cumple con el criterio, el movimiento se realiza; si no, se elige el siguiente movimiento en la lista de movimientos. Al realizarse este movimiento se incluye en la lista tabú y queda prohibido un cierto número de iteraciones.

A continuación se verifica si se ha cumplido el criterio de paro. Si aún el número de iteraciones no se ha cumplido, el programa parte de la solución actual y genera la lista de soluciones adyacentes a esta. Continúa el proceso nuevamente.

Si ha concluido, se puede realizar una transferencia del programa para realizar alguna estrategia de intensificación, diversificación o terminar la ejecución del programa.

En la estrategia de intensificación, se retoma la búsqueda partiendo de la mejor solución encontrada durante el proceso de búsqueda.

En la diversificación se genera una nueva solución en forma aleatoria y se realiza la búsqueda en otra región que no ha sido explorada. El proceso se repite hasta que el criterio de paro se cumple.

Tanto la diversificación y la intensificación se pueden realizar el número de veces que se considere necesario, dependiendo siempre del problema a optimizar.

4. 3 Sistema de 9 nodos de carga

Para este trabajo se consideran dos sistemas de prueba:

El primero de ellos es un sistema de 9 nodos de carga donde se considera una red de distribución radial [Su y Lee 2002]. En el segundo se considera una red de

distribución radial de 69 nodos [Baran y Wu 1989]. En ambos casos se consideran sistemas trifásicos balanceados para simplificar el análisis.

El primer sistema se muestra en la figura 4.2, donde se considera un alimentador de 23 kV que consta de 9 secciones de carga, en el cual el nodo 1 representa la subestación de distribución,.

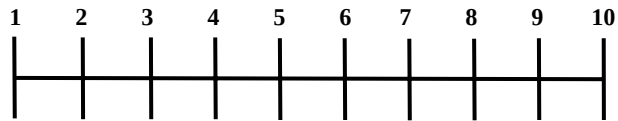


Figura 4.2. Alimentador de 9 secciones de carga de 23 kV.

La tabla 4.1 muestra las impedancias para las 9 secciones del alimentador. Los datos de las cargas se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.1. Impedancias del alimentador.

Bus i	Bus $i + 1$	$R_{i,i+1}(\Omega)$	$X_{i,i+1}(\Omega)$
0	1	0.1233	0.4127
1	2	0.0140	0.6051
2	3	0.7463	1.2050
3	4	0.6984	0.6084
4	5	1.9831	1.7476
5	6	0.9053	0.7886
6	7	2.0552	1.1640
7	8	4.7953	2.7160
8	9	5.3434	3.0264

Para este problema, considerando la ecuación 4.1, se selecciona K_p de un valor de 168 \$/(kW-año).

Tabla 4.2. Cargas del alimentador.

Bus	P _L (kW)	Q _L (kvar)
1	1840	460
2	980	340
3	1790	446
4	1598	1840
5	1610	600
6	180	110
7	1150	60
8	980	130
9	1640	200
Total	12368	4186

Los límites de voltaje considerados en los nodos para este caso son:

$$V_{\min} = 0.90 \text{ p. u.} \quad (4.4)$$

$$V_{\max} = 1.10 \text{ p. u.} \quad (4.5)$$

Donde 1.0 pu equivale a 23 kV.

Las capacidades de los capacitores disponibles con su costo anual correspondiente se listan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Tamaños de capacitores y costo anual.

Capacidad (Kva.)	150	300	450	600	900	1200
Costo (\$/kvar)	75	97.5	114	132	165	204

Las capacidades que se van a emplear para la búsqueda son múltiplos de las cantidades base de capacitores que se tienen, se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Capacidades disponibles de capacitores.

1	2	3	4	5	6	7
0	150	300	450	600	750	900
8	9	10	11	12	13	14
1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950
15	16	17	18	19	20	21
2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
22	23	24	25	26	27	28
3150	3300	3450	3600	3750	3900	4050

La numeración que se encuentra anotada sobre la capacidad de cada banco de capacitores, se usará después para identificarlos con mayor facilidad. Así, el banco de capacitores número 1, corresponde el capacitor con capacidad de 0 kVARS; el banco número 2, corresponde al capacitor con capacidad de 150 kVARS; y así sucesivamente.

Por lo tanto, para este problema se tienen 9 posibles localizaciones y 28 tamaños de capacitores disponibles.

Para este primer problema se consideran dos casos:

Caso 1: En el primer caso, se consideran solamente 3 posibles localizaciones para la compensación: los nodos 4, 5, 6. La elección de los nodos se hace en forma arbitraria para reducir el espacio de soluciones. Posteriormente se hará una búsqueda en todo el espacio y se comprobará la solución.

Los parámetros que se consideran en este caso son los siguientes:

- El tamaño de la lista tabú es 3.
- El número de iteraciones del proceso es de 5.
- El criterio de aspiración para el movimiento tabú es que éste sea el mejor movimiento de la búsqueda hasta el momento.
- Se realizan una diversificación y una intensificación.

En la tabla 4.5, se muestra la condición inicial de la que parte la búsqueda. La conexión inicial contiene 3 elementos (24, 15, 6), los cuales corresponden a los nodos 4, 5 y 6 respectivamente. El valor de cada uno de los elementos en el vector de conexión corresponde a las capacidades de los capacitores en cada uno de éstos nodo. Esta numeración, se encuentra en la tabla 4.4.

En la tabla 4.5 se muestran las capacidades de los capacitores en los nodos 4, 5 y 6, en el vector de condiciones iniciales. Las pérdidas de potencia se obtienen a partir del análisis de los flujos de potencia.

Tabla 4.5. Condición inicial de la búsqueda.

Conexión inicial = (24, 15, 6)	
Nodo	Capacidad (kVAR)
4	3450
5	2100
6	750
Costo = 1.1893e+005	Pérdidas = 700.6295 kW

En la figura 4.3 se muestra la estructura de la lista tabú (T), en la cuál el primer elemento corresponde al movimiento realizado, o actual, donde se almacenan el número correspondiente a la capacidad del capacitor y el nodo al que está conectado. En el segundo elemento se almacena el movimiento anterior en el que se almacenan los mismo parámetros.

$Movimiento \rightarrow$	Actual		Anterior	
	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0	0	0	0

$T =$

Figura 4.3. Lista tabú inicial (T), para el problema de localización de capacitores.

En la tabla 4.6 se muestra la primer iteración del método, en la parte superior se tiene la conexión actual y las pérdidas correspondientes a ella. Además se listan los

mejores movimientos en la vecindad, mostrando los cambios en la conexión y su correspondiente valor de pérdidas de potencia real.

Se tiene una columna para indicar cuándo el movimiento está prohibido. Si en algún movimiento aparece un 1 en la columna marcada "Tabú", significa que el movimiento está en la lista tabú y está prohibido para esa iteración.

Tabla 4.6. Iteración 1, caso 1.

Conexión actual: (24, 15, 6)		Pérdidas = 700.6295 kW
Movimiento	Tabú = 1	Pérdidas (kW)
(25, 15, 6)		702.0251
(26, 15, 6)		703.5580
(24, 16, 6)		703.6900
(27, 15, 6)		705.2276
(28, 15, 6)		707.0332

El movimiento que se elige en esta iteración, es el primero de la lista. Se realiza un intercambio de capacitores en el nodo 4 (el primer elemento en la lista de conexión). Solamente se cambia la capacidad del capacitor de 24 (3450 kVARS) a 25 (3600 kVARS). Y este movimiento se almacena en la lista tabú como se observa en la figura 4.4.

Movimiento →

Actual		Anterior	
24	4	25	4
0	0	0	0
0	0	0	0

T =

Figura 4.4. Lista tabú para la primera iteración.

En la tabla 4.7 se tienen ahora la nueva lista de movimientos desde la solución actual, observándose que ahora aparece un movimiento prohibido. En este momento, el primer elemento es el mejor y se elige.

Tabla 4.7. Iteración 2, caso 1.

		Conexión actual: (25, 15, 6)	Pérdidas = 702.0251 kW
		Movimiento	Tabú = 1
Mejores movimientos	(25, 14, 6)		699.1512
	(24, 15, 6)	1	700.6295
	(26, 15, 6)		703.5580
	(25, 16, 6)		705.2200
	(27, 15, 6)		707.0332

En la figura 4.5 se muestra el ingreso del movimiento realizado a la lista tabú. El movimiento que antes se encontraba en la lista tabú en la primera posición, pasa a ocupar la segunda posición dentro de la lista tabú.

Movimiento →

Actual		Anterior	
14	5	15	5
24	4	25	4
0	0	0	0

$T =$

Figura 4.5. Lista tabú para la segunda iteración.

En la tabla 4.8 se muestra la tercera iteración del método. No hay algo en particular que resaltar de ella. La elección del movimiento es la misma que en las iteraciones previas.

En la figura 4.6, la lista tabú se encuentra llena y el último movimiento de la lista nada más estará prohibido para la siguiente iteración.

Tabla 4.8. Iteración 3, caso 1.

		Conexión actual: (25, 14, 6)	Pérdidas = 699.1512 kW
		Movimiento	Tabú = 1
Mejores movimientos	(26, 14, 6)		700.5493
	(25, 15, 6)	1	702.0251
	(27, 14, 6)		702.0848
	(28, 14, 6)		703.7569
	(25, 16, 6)		705.2200

Movimiento →

T =

Actual		Anterior	
26	4	25	4
14	5	15	5
24	4	25	4

Figura 4.6. Lista tabú para la tercera iteración.

Para la iteración 4, se muestran en la tabla 4.9 los mejores movimientos. Obsérvese que el primer movimiento de la lista es el mejor, pero se encuentra en la lista tabú, por lo que se revisa el criterio de aspiración. Dado que el valor obtenido por este movimiento no es el mejor obtenido durante la búsqueda, el criterio no se cumple, y el movimiento no puede ser liberado y no se realiza.

Tabla 4.9. Iteración 4, caso 1.

		Conexión actual: (26, 14, 6)	Pérdidas = 700.5493 kW
		Movimiento	Tabú = 1
Mejores movimientos	(25, 14, 6))	1	699.1512
	(26, 14, 7)		708.2363
	(26, 14, 8)		717.7028
	(26, 14, 9)		728.9071
	(26, 14, 10)		741.8096

Por lo tanto el movimiento que se elige es el segundo de la lista, que aunque empeora el valor de las pérdidas, ayuda a que la búsqueda no regrese a un punto visitado con anterioridad. Con ello la búsqueda va hacia una nueva región en el espacio de búsqueda.

En la figura 4.7, en la lista tabú se encuentra el movimiento realizado y además se liberó el movimiento de la primer iteración.

Movimiento →	Actual		Anterior	
	7	6	6	6
	26	4	25	4
	14	5	15	5

Figura 4.7. Lista tabú para la cuarta iteración.

En la tabla 4.10 y en la figura 4.8 se muestra la última iteración del método.

Tabla 4.10. Iteración 4, caso 1.

		Conexión actual: (26, 14, 7)	Pérdidas = 708.2363 kW
		Movimiento	Tabú = 1
Mejores movimientos	(26, 11, 7)		700.2390
	(21, 14, 7)		702.0088
	(26, 12, 7)		702.5802
	(22, 14, 7)		702.9767
	(23, 14, 7)		704.0841

Movimiento →	Actual		Anterior	
	11	5	14	5
	7	6	6	6
	26	4	25	4

Figura 4.8. Lista tabú para la cuarta iteración.

Después de terminada esta etapa, se comienza con la búsqueda en una nueva región del espacio de soluciones mediante la diversificación.

La conexión generada, en forma aleatoria, se muestra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Condición inicial para el proceso de diversificación, caso 1.

Conexión = (24, 26, 19)	
Costo = 1.7246e + 005	Pérdidas = 1015.6 kW

La evolución de la búsqueda se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Iteración 4, caso 1.

Iteración	Conexión	Pérdidas (kW)
0	(24, 26, 19)	1015.6
1	(24, 26, 2)	725.4841
2	(23, 26, 2)	723.3020
3	(23, 26, 3)	726.9132
4	(23, 24, 3)	716.9580
5	(22, 24, 3)	715.0334

Nótese que la diversificación nos llevó a una región que empeora en mucho las pérdidas del sistema, por lo que se conserva de la primera etapa el mejor valor obtenido.

Es importante mencionar, que cuando se realiza la diversificación, la lista tabú es inicializada en cero para realizar nuevamente la búsqueda.

Finalizada la etapa de diversificación, continúa un proceso de intensificación, tomando como punto de inicio la mejor solución obtenida durante el proceso de búsqueda, la cual se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Solución parcial para el caso 1.

Mejor Conexión = (25, 14, 6)	
Costo = 1.1869e+005	Perdidas = 699.1512 kW

La búsqueda partiendo del punto marcado en la tabla 4.13, evoluciona como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Evolución del proceso de intensificación, caso 1.

Iteración	Conexión	Pérdidas (kW)
0	(25, 14, 6)	699.1512
1	(26, 14, 6)	700.5493
2	(27, 14, 6)	702.0848
3	(25, 14, 6)	709.1512
4	<i>No hay conexiones factibles o son tabú</i>	

En esta parte termina el proceso de intensificación. De donde se observa que no se logró mejorar el resultado.

Finalmente, el resultado de la búsqueda se resume en la tabla 4.15, donde se muestran el número de la iteración en la que se encontró el mejor resultado, las capacidades, así como la localización de los capacitores, las pérdidas de potencia real y el costo total en \$.

Tabla 4.15. Resultado de la búsqueda para el caso 1.

<i>Iteración 2, 1era Búsqueda</i>	
Mejor Conexión Nodo4 → 3600 kVAR Nodo5 → 1950 kVAR Nodo6 → 750 kVAR	Costo =
	1.1869e+005
	Pérdidas =
	699.1512 kW

Y los voltajes máximo y mínimo en los nodos del sistema en p.u. son los mostrados en la tabla 4.16., en los cuales se comprueba que se cumplió con las restricciones planteadas para el problema.

Tabla 4.16. Voltajes máximo y mínimo en p.u.

	Nodo	Voltaje Compensado (p. u.)
Máximo	1	1.0000
Mínimo	10	0.9002

Para observar de una forma más ilustrativa la evolución completa de la búsqueda, en la figura 4.9, se muestra el proceso de búsqueda incluyendo las estrategias de intensificación y diversificación.

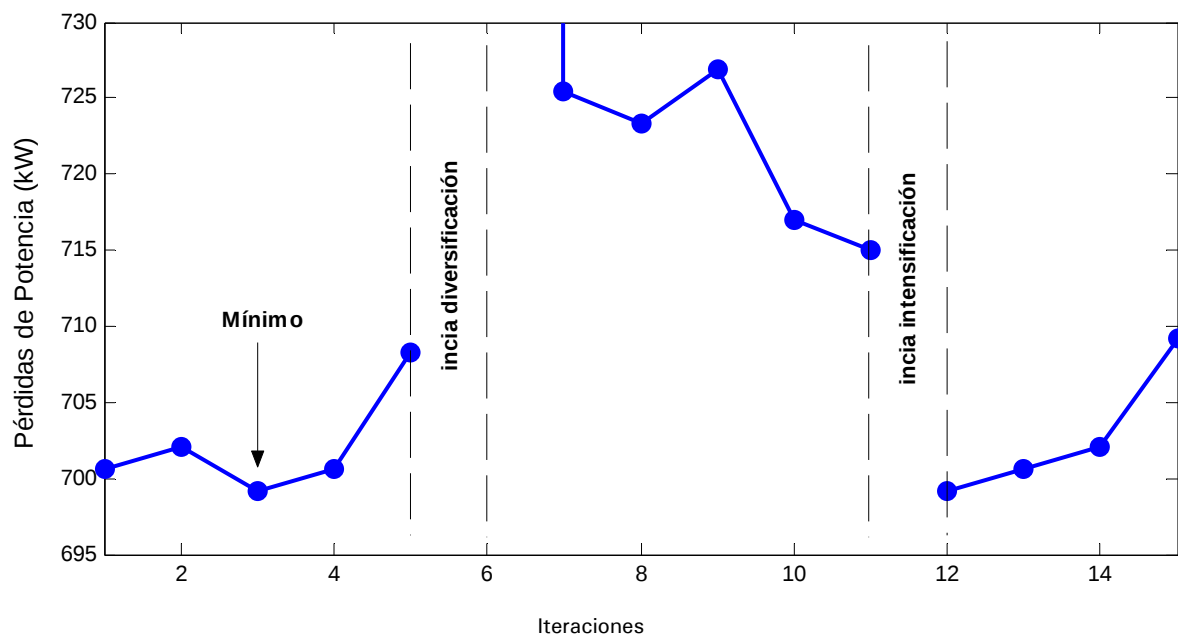


Figura 4.9. Evolución de la búsqueda tabú considerando 3 ubicaciones.

En la figura 4.9 se puede observar las etapas de proceso de búsqueda. En primer plano se encuentra el mínimo encontrado en la búsqueda en la iteración 3.

A continuación, inicia la etapa de diversificación donde el punto inicial tiene un valor muy elevado de las pérdidas en la función de costos y sale fuera del rango de graficación, por lo que aparece como se muestra en la figura 4.9.

Después que termina este proceso, da comienzo la etapa de intensificación, la cual parte de la mejor solución encontrada durante la búsqueda. Se observa que los siguientes puntos encontrados no mejora el valor de la función de costos, por lo que el proceso se detiene en la iteración 15.

Para este caso con tres posibles localizaciones, se observó que con 5 iteraciones y una etapa de intensificación y diversificación era suficiente, para encontrar el valor óptimo para este problema.

Dado que el espacio de soluciones en este caso se reduce al considerar sólo tres posibles ubicaciones de los bancos de capacitores, se realiza una búsqueda exhaustiva con el fin de encontrar el valor óptimo para este caso.

El resultado de la búsqueda exhaustiva se ilustra en la tabla 4.17

Tabla 4.17. Resultado de la búsqueda exhaustiva considerando 3 localizaciones.

<i>Búsqueda Exhaustiva</i>	
Mejor Conexión	Costo =
Nodo4 → 3600 kVAR	1.1869e + 005
Nodo5 → 1950 kVAR	Pérdidas =
Nodo6 → 750 kVAR	699.1512 kW

Y los voltajes máximo y mínimo se muestran en la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Voltajes máximo y mínimo en p.u.

	Nodo	Voltaje Compensado (p. u.)
Máximo	1	1.0000
Mínimo	10	0.9002

Comprobándose que el resultado que se obtuvo usando la técnica de la búsqueda tabú fue *óptimo*.

Es importante notar que en este caso, el número de posibles soluciones para realizar la búsqueda exhaustiva es de $(27+1)^3 = 28192$ (debido a que son 28 combinaciones de posibles tamaños de bancos de capacitores).

Para este caso, el tiempo empleado en la búsqueda exhaustiva es de aproximadamente 35 minutos. Mientras que para la búsqueda tabú el tiempo empleado usando la etapa de intensificación y diversificación es de aproximadamente 5 min.

Caso 2: Para este caso, todos los nodos están disponibles para la compensación, excepto el nodo 1 que representa a la subestación.

Dado que el espacio de soluciones es más grande que en el primer caso, los parámetros que se consideran son los siguientes:

- El número de iteraciones es de 15,
- Tamaño de lista tabú se considera de 7.
- Se realiza una intensificación y 2 diversificaciones.
- El criterio de aspiración es el mismo que en caso anterior.

Se usa otra de las características de la búsqueda tabú: la frecuencia. En este caso, se considera una frecuencia de 5. Es decir, se puede realizar el mismo movimiento en no más de 5 ocasiones.

Se parte de la conexión inicial, mostrada en la tabla 4.19, donde se hace referencia a los valores de las capacidades de los capacitores conectados en cada uno de los nodos del SED, además de las pérdidas de potencia y el costo total asociado a la conexión dada

Tabla 4.19. Conexión inicial para el problema con 9 nodos de carga.

Conexión = (5, 20, 11, 25, 24, 17, 14, 26, 24)	
Nodo	Capacidad (kVAR)
1 *	0
2	600
4	1500
8	1950
7	2400
3	2850
6	3450
10	3450
5	3600
9	3750
Costo = 4.7037e+005	Pérdidas = 2773.8 kW

* El nodo 1 corresponde a la subestación y es el nodo "slack" en la formulación de flujos.

El desarrollo de la búsqueda se muestra en la tabla 4.20., así como los resultados de las estrategias de intensificación y diversificación.

Tabla 4.20. Evolución de la búsqueda para el problema con 9 nodos de carga.

Iteración	Conexión	Pérdidas (kW)
0	(5, 20, 11, 25, 24, 17, 14, 26, 24)	2773.8
1	(5, 20, 11, 25, 24, 17, 14, 26, 1)	1.6748
2	(5, 20, 11, 25, 24, 17, 14, 1, 1)	1.0222
3	(5, 20, 11, 25, 1, 17, 14, 1, 1)	792.7276
4	(5, 20, 11, 25, 1, 1, 14, 1, 1)	698.6892
5	(5, 20, 11, 25, 1, 1, 13, 1, 1)	694.2225
...	...	...
Diversificaciones (mejor)		Perdidas = 681.0403 kW
Intensificación		Perdidas = 679.7052 kW

Y el resultado obtenido en la búsqueda se encuentra en la tabla 4.21.

Tabla 4.21. Resultado para el problema con 9 nodos de carga.

<i>Iteración 11, Intensificación</i>	
Mejor Conexión Nodo1 → 0 Nodo2 → 0 Nodo3 → 4050 kVAR Nodo4 → 2700 kVAR Nodo5 → 1050 kVAR Nodo6 → 900 kVAR Nodo7 → 1350 kVAR Nodo8 → 0 Nodo9 → 0 Nodo10 → 300	Costo = 1.1620e + 005
	Pérdidas = 679.7052 kW

Y finalmente, los voltajes máximo y mínimo en los nodos se muestra en la tabla 4.22., donde se muestra que se cumple con las restricciones de voltaje.

Tabla 4.22. Voltaje máximo y mínimo para el problema con 9 nodos de carga.

	Nodo	Voltaje Compensado (p. u.)
Máximo	1	1.0000
Mínimo	10	0.9001

En la figura 4.10. se observa cómo evoluciona la búsqueda y cada una de las etapas de intensificación y la mejor de las diversificaciones.

En la etapa de diversificación, que se ilustra en la figura 4.10, se observa que la solución es mejorada, sin embargo, no se encuentra el valor mínimo de la búsqueda. Después se realiza la etapa de intensificación, la cual encuentra una buena solución, y es la mejor solución encontrada.

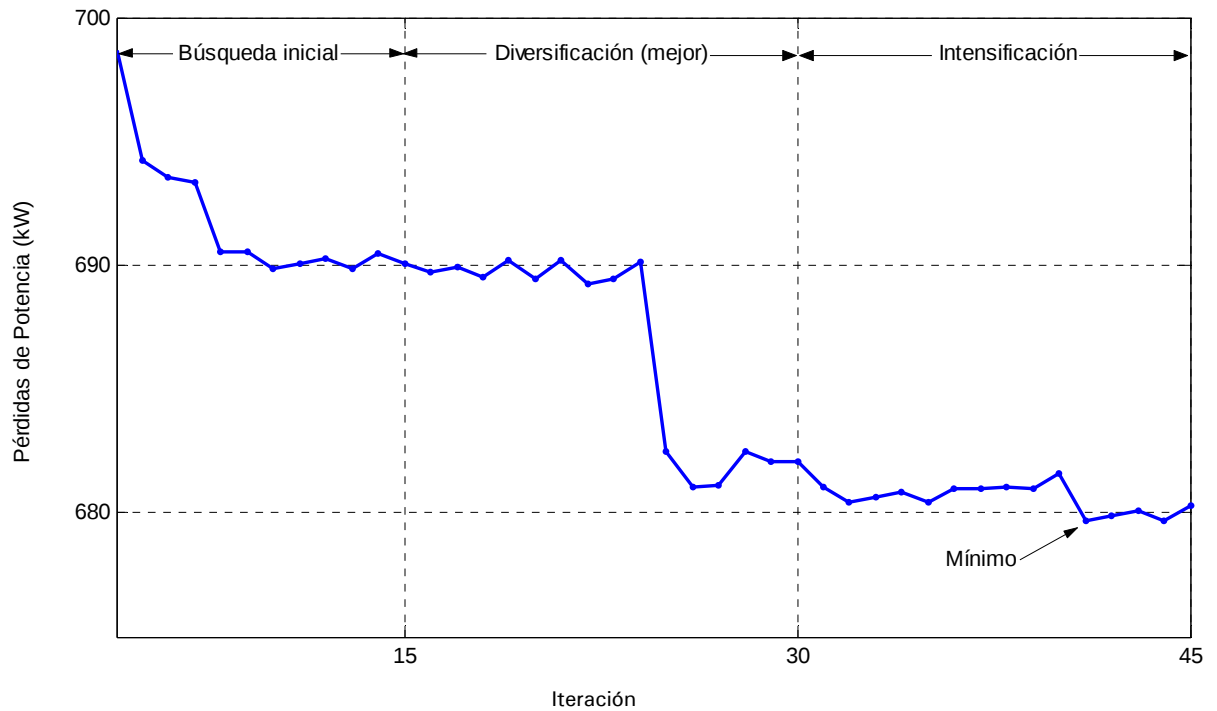


Figura 4.10. Evolución de la búsqueda tabú considerando todos los nodos.

Para observar el comportamiento del de localización, se realizaron varias búsquedas intentando mejorar la solución obtenida, dando la gráfica de la figura 4.11, a partir de las mejores soluciones encontradas.

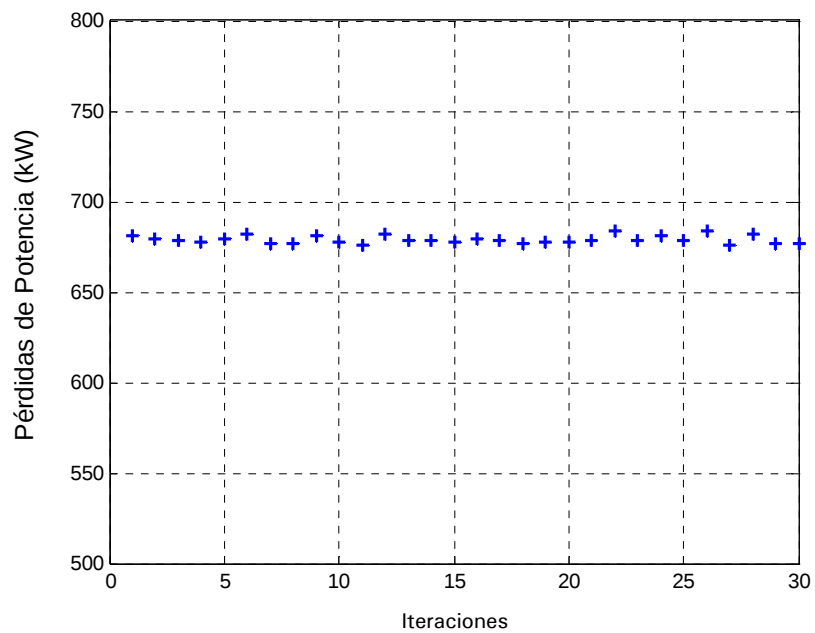


Figura 4.11. Distribución de soluciones para alimentador de 9 nodos.

De la gráfica de la figura 4.11:

$$Potencia\ Promedio = 678.9227\ kW$$

$$Potencia\ Máxima = 683.5704\ kW$$

$$Potencia\ Mínima = \mathbf{675.6466\ kW}$$

De la mejor solución obtenida en la búsqueda, se tiene en la tabla 4.23 el perfil de voltaje en cada nodo del sistema con y sin compensación; también se muestra la localización de los capacitores y sus capacidades

Tabla 4.23. Voltajes antes y después de la compensación para la red de 9 nodos.

Nodo	Voltaje Sin Compensar (p. u.)	Voltaje Compensado (p. u.)	Capacitor Localizado (kVAR)
1	1.0000	1.0000	-
2	0.9929	1.0011	0
3	0.9874	1.0076	4050
4	0.9634	0.9989	2550
5	0.9480	0.9886	1800
6	0.9172	0.9659	1200
7	0.9072	0.9577	150
8	0.8890	0.9420	0
9	0.8587	0.9170	150
10	0.8375	0.9001	450

El Costo y las Pérdidas en la red antes y después de la compensación se muestran en la tabla 4.24, así como el ahorro debido a la compensación.

Tabla 4.24. Pérdidas y costos antes y después de la compensación para la red de 9 nodos.

	Sin Compensar	Compensado
Pérdidas (kW)	783.7286	675.6466
Costo Anual (\$)	131, 670	115, 520
Ahorro (\$)	-	16, 146

De las tablas anteriores se puede observar que se mejoró tanto el perfil de voltaje en cada uno de los nodos, como las pérdidas totales del sistema, lográndose disminuir en un 13.7% las pérdidas de potencia real. El costo anual disminuye en un 12.26%

Por tanto el número óptimo de capacitores es de 7, y las capacidades de cada uno, así como su ubicación en la red, se mostraron en la tabla.

En lo correspondiente a este caso, el número total de posibles soluciones es de $28^9 = 1.05 \times 10^{13}$, el cual es demasiado elevado y no se realizó la revisión de todo el espacio de soluciones porque resulta impráctico. Con la búsqueda tabú nos ahorramos mucho tiempo, obteniendo una muy buena solución en poco tiempo.

4.4 Sistema de 69 nodos

El siguiente sistema al que se aplicó la técnica de la búsqueda tabú, es un sistema radial de distribución de 69 nodos [Baran y Wu 1989], que se muestra en la figura 4.12. Los datos del sistema se muestran en el Apéndice A.

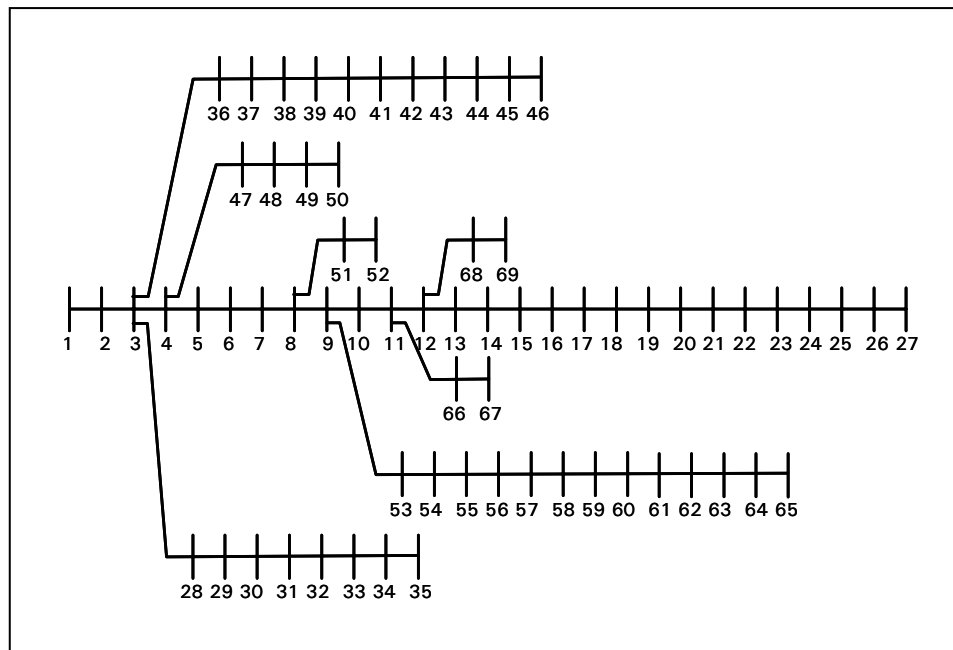


Figura 4.12. Sistema radial de 69 Nodos.

La función objetivo para este problema es la misma que para el problema previamente analizado.

El costo anual por unidad de pérdidas de energía, K_p , se considera de 205,830 \$/(kW-año) y los límites de voltaje considerados en los buses para este problema son:

$$V_{\min} = 0.95 \text{ p. u.} \quad (4.6)$$

$$V_{\max} = 1.05 \text{ p. u.} \quad (4.7)$$

Los tamaños de capacitores disponibles con su costo anual correspondiente se listan en la tabla 4.25.

Tabla 4.25. Tamaños de capacitores y costo anual.

Capacidad (Kva.)	300	600	900	1200
Costo (\$/kvar)	56, 300	112, 600	168, 900	225, 200

Las capacidades que se emplean en este problema son las indicadas en la tabla 4.26.

Tabla 4.26. Capacidades de capacitores disponibles.

1	2	3	4	5
0	300	600	900	1200

De igual forma que en el problema con 9 nodos de carga, en las capacidades de capacitores disponibles, se crea un capacitor con capacidad cero, esto ayuda a que se tengan en consideración en todos los nodos del sistema un capacitor disponible. Entendiéndose que si se tiene un capacitor de capacidad cero en algún nodo, significa que el nodo no necesita compensación.

Algunas consideraciones que se tomaron para este problema, dado que el espacio de soluciones es mucho mayor que en los casos considerados anteriormente, son:

- El número de iteraciones es de 20 y el tamaño de la lista tabú se incrementa a un valor de 9.
- Se realiza una etapa de intensificación y tres etapas de diversificación.
- En este problema, el espacio de soluciones se incrementa en forma considerable. Para acelerar el tiempo de búsqueda empleado por la técnica Tabú, el espacio de búsqueda se limita a 10 nodos.

En [Huang y Yang y Huang C.L., 1996] se hace un análisis previo del sistema para este cometido. Se realiza un análisis de sensibilidades para seleccionar aquellos nodos que tienen un impacto mayor en las pérdidas de potencia real en el sistema con respecto a las potencias reactivas nodales. Los nodos resultantes son candidatos para la localización de capacitores.

En lo que corresponde a este problema, para hacer la reducción del espacio de soluciones, observando los datos del sistema, se eligen los nodos que demandan mayor potencia. Considerándose que ellos son los que más influyen en el consumo y las pérdidas de potencia del sistema.

Dado lo anterior, los nodos que se seleccionan para la búsqueda son los nodos 8, 11, 12, 21, 48, 49, 50, 59, 61, 64.

Los resultados que se obtuvieron, se resumen en la tabla 4.27. Donde se encuentra que el número óptimo de capacitores encontrado mediante la búsqueda es de 4 capacitores. Se muestran también, la localización de cada uno de los capacitores, así como sus capacidades respectivas

Tabla 4.27. Resultado de la búsqueda, red de 69 nodos.

<i>Iteración 9, 3a Diversificación</i>	
Mejor Conexión	
Nodo8 → 0	Costo = 3.1054e + 007
Nodo11 → 0	
Nodo12 → 0	
Nodo21 → 300 kVAR	
Nodo48 → 0	
Nodo49 → 600 kVAR	Pérdidas = 151. 6084 kW
Nodo50 → 0	
Nodo59 → 0	
Nodo61 → 1200 kVAR	
Nodo64 → 900 kVAR	

Además se cumple con las restricciones de voltaje de este problema en particular. Se muestran en la tabla 4.28 los voltajes máximo y mínimo resultantes.

Tabla 4.28. Voltajes antes y después de la compensación para la red de 69 nodos.

	Sin Compensar (p. u.)	Voltaje Compensado (p. u.)
Máximo	1.0000	1.0000
Mínimo	0.9174	0.9504

El Costo y las Pérdidas en la red antes y después de la compensación, así como el ahorro debido a la compensación, se muestran en la tabla 4.29.

Tabla 4.29. Pérdidas y costos antes y después de la compensación para la red de 69 nodos.

	Sin Compensar	Compensado
Pérdidas (kW)	188.6244	151. 6084
Costo Anual (\$)	46, 988, 000	31, 054, 000
Ahorro (\$)	-	15, 934, 000

Se observa que se mejoraron las pérdidas de potencia en forma considerable (disminuyen en un 19.6%) y el ahorro anual es de aproximadamente 34%. También, se mejoró el perfil de voltaje en cada uno de los nodos del sistema.

En forma Gráfica, la evolución de la búsqueda se muestra en la figura 4.13.

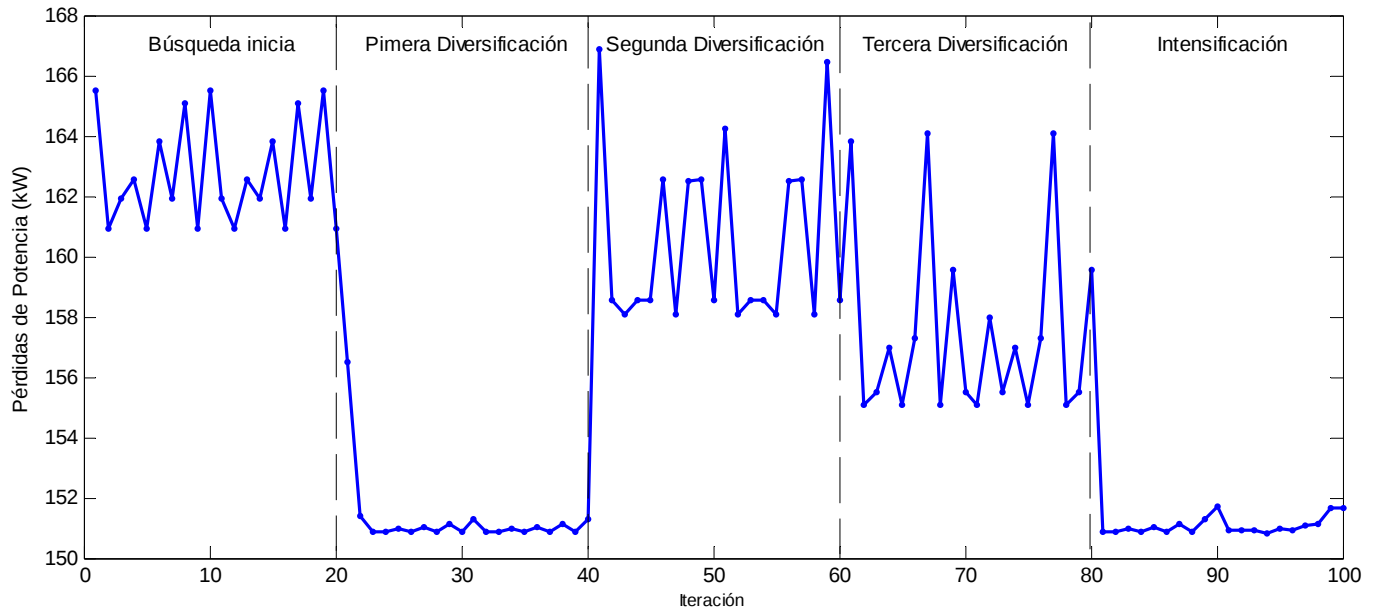


Figura 4.13. Evolución de la búsqueda tabú, sistema de 69 nodos.

En la figura 4.13 se observa que en la primera diversificación se obtiene el mínimo en la búsqueda. En las demás etapas de diversificación el método no encuentra una solución mejor, por lo que se realiza la intensificación partiendo de la mejor solución encontrada en la primera diversificación.

La etapa de intensificación no mejora la solución obtenida. Entonces la búsqueda termina y el mejor valor obtenido, es el indicado en la tabla 4.27.

4. 5 Sintonización de parámetros

En los métodos heurísticos generalmente existen parámetros que deben ser ajustados o calibrados para un mejor desempeño del método en particular. Este ajuste es necesario debido a que dependiendo del problema a resolver, se pueden obtener mejores o peores soluciones dependiendo de tales parámetros.

En el problema de localización de capacitores, algunos parámetros importantes que necesitan calibrarse son: El tamaño de la vecindad y el tamaño de la lista tabú.

4. 5. 1 Tamaño de la vecindad

En la definición de la vecindad, se debe considerar un tamaño que genere una buena diversidad de soluciones pero que no haga el proceso de búsqueda muy lento. Es decir, que la cantidad de soluciones adyacentes no sea tan grande que pueda incrementar considerablemente el tiempo computacional.

Para el problema de localización de capacitores, se define la vecindad como el movimiento de un capacitor a cualquier otro nodo del sistema o el cambio en la capacidad de cualquier capacitor conectado en un nodo. En la figura 4.14, se muestra un alimentador radial de 5 nodos.

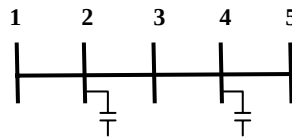


Figura 4.14. Alimentador de 5 nodos.

Suponiendo que el nodo 1 no necesita compensación y que sólo se pueden adquirir dos bancos de capacitores de las capacidades marcadas en la tabla 4.4, (28 capacidades disponibles), la vecindad para este problema estaría formada, primeramente, por los movimientos de los capacitores en los nodos 2 y 4 a los nodos 3 o 5; y además, por los cambios de las capacidades de los capacitores conectados en los nodos 2 y 4, es decir, hay 27 opciones para cada capacitor.

En este sentido, en cada iteración el número de posibles operaciones que se pueden realizar es de 58. 54 para las capacidades actuales, y 4 intercambios posibles.

En el problema del alimentador de 9 secciones de carga, al considerar capacitores en todos los nodos y tener una capacidad de 0 kVARS, la vecindad es de

243 “movimientos” en cada iteración. Sólo se realiza el cambio en las capacidades y no hay movimientos en los capacitores.

En este caso no hubo reducción de la vecindad. Se consideró la vecindad completa debido a que se trata de un sistema pequeño en el cual hacer el análisis de las soluciones adyacentes no implicaba mucho esfuerzo computacional en el tiempo.

Para el alimentador de 69 secciones, el problema se incrementó en sus dimensiones. Debido a que el sistema es de mayores proporciones que el del alimentador de 9 secciones de carga, el número de nodos de búsqueda se limitó a 10 ubicaciones. Podría decirse que la vecindad fue reducida a 1/3 de su tamaño normal.

Esta reducción se justifica, debido a que el tiempo de análisis para el sistema se incrementa de forma considerable al incrementarse el número de nodos, al igual que la consideración tomada para la elección de los nodos especificados en la sección previa.

4. 5. 2 tamaño de la lista tabú

En la lista tabú se almacenan los cambios realizados con anterioridad, así como los valores obtenidos en la función de costos.

Se realizaron diferentes pruebas para determinar el tamaño de la lista tabú, que fuera más adecuado para cada uno de los problemas considerados. A partir de este parámetro se determina por cuanto tiempo permanece un movimiento como prohibido dentro de la lista tabú.

En las figuras 4.15 y 4.16, se muestra la calidad de la solución obtenida para diferentes dimensiones de la lista tabú para los dos sistemas.

Para el sistema de 9 nodos se observa que el mejor valor de la función objetivo obtenido durante la búsqueda es para una lista tabú de tamaño 7. Debido a esto se hizo la selección de la dimensión de la lista tabú de este valor.

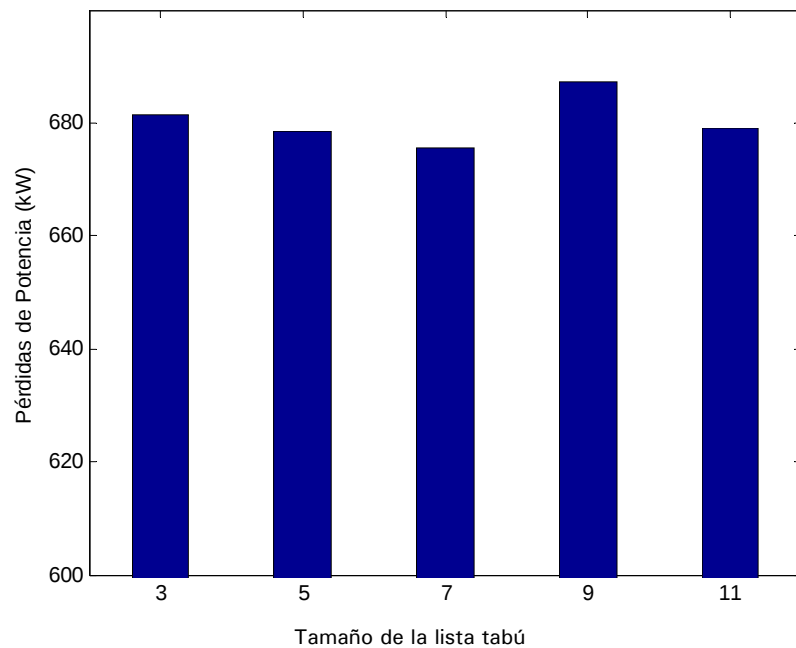


Figura 4.15. Calidad de la solución obtenida vs tamaño de la lista tabú, Sistema de 9 nodos.

Para una lista tabú de tamaño 5 se observó que los resultados obtenidos son los que más cerca se encuentran de las mejores soluciones obtenidas por el tamaño 7. En lo referente al tamaño de lista tabú de 3, no escapa de los óptimos locales, por lo cual no llega a buenos resultados. En cuanto a los tamaños 9 y 11 de la lista tabú, al prohibir ciertos movimientos puede que se esté evitando que la búsqueda tome rutas que la guíen a mejores soluciones y por ello no se hayan alcanzado buenos resultados.

Cuando la lista tabú es grande, se pueden omitir buenas rutas hacia soluciones óptimas durante el proceso de búsqueda. Por eso es muy importante que el tamaño de la lista tabú sea el adecuado, lamentablemente no existe una metodología que ayude a determinar el tamaño óptimo.

En la figura 4.16, para el sistema de 69 nodos, se muestra la calidad de las soluciones obtenidas variando también la dimensión de la lista tabú.

No se observa cambios al incrementar el tamaño de la lista tabú. Podría pensarse que se puede elegir en forma arbitraria este parámetro. Sin embargo, si se

elige el valor más pequeño, la búsqueda podría quedar atrapada en algún mínimo local.

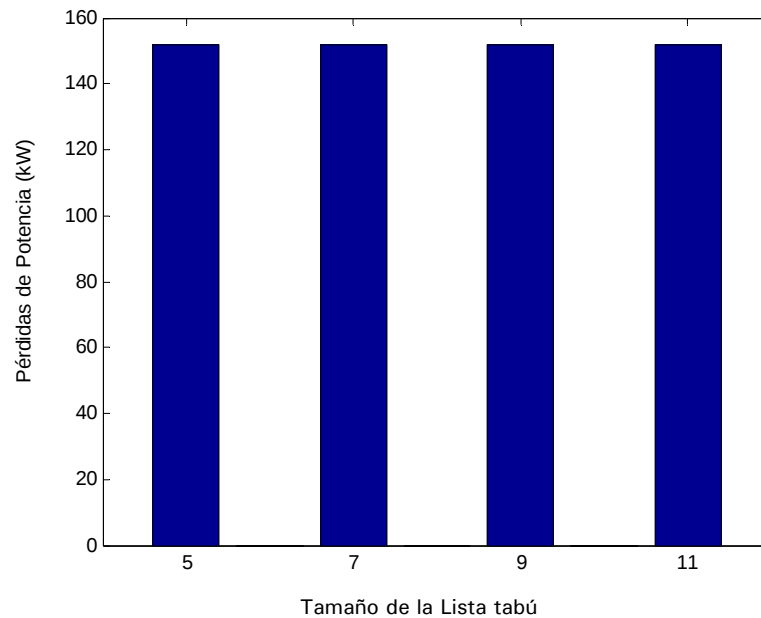


Figura 4.16. Calidad de la solución obtenida vs Tamaño de la lista tabú, Sistema de 69 nodos.

En este caso, el tamaño de la lista tabú que se seleccionó es de 9, considerando que no fue muy restrictiva en las búsquedas que se realizaron.

4. 6 Conclusiones

En este capítulo se mostró la aplicación de la búsqueda tabú al problema de localización de capacitores, aplicándolo a dos sistemas de prueba. En el primero se los casos analizados, el algoritmo se comportó de forma satisfactoria obteniéndose el mínimo global. Lo anterior se comprobó usando búsqueda exhaustiva.

En el sistema de 69 nodos, el algoritmo mostró deficiencias al incrementarse el tiempo de búsqueda. Sin embargo, se encontró una solución que proporciona un gran ahorro.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos futuros

5. 1 Conclusiones generales

En este trabajo se implementó en MatLab el método de la búsqueda tabú para resolver el problema de localización óptima de capacitores. Se analizaron dos ejemplos numéricos, dos sistemas de diferentes tamaños (9 y 69 nodos), en los que se pudo mostrar el uso de la técnica tabú.

El desempeño y los resultados que se obtuvieron de la búsqueda tabú fueron satisfactorios, aunque el tiempo computacional empleado en el sistema de 69 nodos fue mayor. En la búsqueda mostrada fue de alrededor de 2 hrs.

Es importante señalar que también el desempeño de la búsqueda y la calidad de las soluciones obtenidas, dependen de la sintonización de las dimensiones de la lista tabú, el número de iteraciones, y los demás parámetros. Por ellos es importante hacer una selección adecuada de ellos.

También se implementó el método de la búsqueda tabú para resolver el problema del árbol de expansión mínima. Se desarrolló un programa en Matlab el cual podría ser tomado como base, haciendo algunas modificaciones, para el diseño de redes, o para determinar rutas de flujo con el mínimo costo, entre otras aplicaciones.

La técnica implementada mostró ser atractiva para su aplicación en problemas de optimización combinatoria, donde la función objetivo puede ser compleja.

5. 2 Recomendaciones

Para este problema en particular, el mayor esfuerzo computacional se da en la determinación de las pérdidas en el sistema. Es decir, el programa emplea el mayor tiempo computacional en el análisis de los flujos de potencia presentes en el sistema, debido a que la topología de los sistemas de distribución es radial y la matriz

Jacobiana es muy dispersa. Por ello se recomienda emplear algún otro método de resolución de flujos de potencia, que saque provecho de la topología de los sistemas de distribución.

Algunos desarrollos que han resultado eficientes en el cálculo de los flujos de potencia en sistemas radiales son:

- Método Escalonado.
- Método de Suma de Corrientes.
- Método de suma de Potencias.

En forma simplificada se puede decir que estos métodos son extensiones de la forma general del método Gauss-Seidel.

Se recomienda hacer una implementación de alguno de estos métodos para hacer más eficiente el cálculo de los flujos de potencia y reducir el tiempo computacional empleado en el programa de localización de capacitores.

Un rasgo importante en la implementación de la búsqueda tabú es la sintonización de los parámetros, de las estructuras que la conforman (lista tabú, criterios de aspiración, entre otros). Algunos investigadores han considerado números “mágicos” para tales parámetros sin razón aparente.

Lo más recomendable para determinar las dimensiones de estos parámetros es partir de la experiencia, considerando tanto el tamaño como la complejidad del problema a resolver. De ello dependerá la calidad de las soluciones obtenidas durante el proceso de búsqueda.

Lamentablemente, el emplear métodos heurísticos no garantiza que se obtenga un óptimo global, pero sí encontrar buenas soluciones a problemas de optimización de gran complejidad empleando tiempos de cómputo razonables.

5. 3 Trabajos futuros

1. La técnica de la búsqueda tabú fue implementada para sistemas eléctricos de distribución considerando condiciones balanceadas. Un trabajo futuro consistiría en considerar la red trifásica bajo condiciones desbalanceadas.
2. Implementar algún otro método que aproveche las características radiales de la red de distribución.
3. Para mejorar el desempeño del algoritmo desarrollado, implementar la búsqueda tabú en otra plataforma como C++ o FORTRAN para hacerlo más rápido y eficiente.
4. Explotar la técnica de la búsqueda tabú en algún otro tipo de problema de redes eléctricas: planeación, diseño y expansión de redes, coordinación de protecciones, flujos de potencia óptimos, localización de dispositivos SIFLETCA, entre otros.

Bibliografía

[Arrillaga y Arnold, 1990]

Arrillaga, J. y Arnold, C. P., "*Computer Analysis of Power Systems*", Primera ed., John Wiley & Sons, 1990.

[Arrillaga y Arnold, 1991]

Arrillaga, J. y Arnold, C. P., "Computer Modeling of Electrical Power Systems", Primera ed., John Wiley & Sons, 1991.

[Bala, Kuntz y Pebles, 1997]

J. L. Bala, P. A. Kuntz and M. J. Pebles, "Optimal Allocation using a Distribution-Analyzer Recorder", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 464-469.

[Baran y Wu 1989]

Baran, Mesut E., Wu Felix F., "Optimal Capacitor Placement on radial Distribution Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989.

[Chiang, Wang, Cockings y Shin, 1990]

Hsiao-Dong Chiang, Jin-Cheng Wang, Orville Cockings and Hyoun-Duck Shin, "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 643-649.

[Campos y Rahn 1999]

Campos, Y. y Rahn A., "algoritmo evolutivo para el Problema de Árbol de mínima Expansión (MST)", 1999.

[Civanlar y Grainger I, 1985]

S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part I: The Overall Problem", IEEE Transactions on Power Apparatus, Vol. 104, No. 11, November 1985, pp. 3278-3283.

[Civanlar y Grainger II, 1985]

S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part II: The Solution Method", IEEE Transactions on Power Apparatus, Vol. 104, No. 11, November 1985, pp. 3284-3290.

[Civanlar y Grainger III, 1985]

S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part III: The Numerical Results", IEEE Transactions on Power Apparatus, Vol. 104, No. 11, November 1985, pp. 3291-3295.

[Ghose, Goswami y Basu, 1998]

T. Ghose, S. K. Goswami and S.K. Basu, "Energy Loss Reduction in Distribution System by Capacitor Placement Through combined G.A. Technique", IEEE Proceedings 1998, pp. 502-505.

[Glover 1986]

Glover, F., "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", Computers and Operations Research, No. 5, 1986, pp. 553-559.

[Glover 1989]

Glover, F., "Tabu Search – Part I", ORSA Journal on Computing, Vol 1, No. 3, Pp. 190-206, 1989.

[Glover 1990]

Glover, F., "Tabu Search – Part II", ORSA Journal on Computing, Vol 2, No. 3, Pp. 4-32, 1990.

[Glover y Laguna 1993]

Glover, F. y Laguna, M. (1993). "Tabu Search. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*", C. Reeves, ed., Blackwell Scientific Publishing, pp. 71-140.

[Glover y Laguna, 2001]

Glover F. y Laguna M, "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, Cuarta ed. 2001

[Grainger y Stevenson, 1996]

Grainger, J. J. y Stevenson, W. D., "*Análisis de Sistemas de Potencia*", Segunda ed., McGraw Hill, 1996.

[Huang y Yang y Huang C.L., 1996]

Huang Y.C., Yang H.T., Huang C.L., "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, No. 4, pp. 1868-1873, November 1996.

[Laguna, 1994]

Laguna M., "A Guide to Implementing Tabu Search", Investigación Operativa, Vol. 4, No. 1, Abril 1994.

[Metropolis et al., 1953]

Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E.: Equation of state calculation by fast computing machines. Journal of Chemistry Physics, 21: 1087-1091, 1953.

[Miu, Chiang y Darling, 1997]

Karen Nan Miu, Hsiao-Dong Chiang and Gary Darling, "Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Distribution Systems by a GA-Based Two-stage 136 Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12. No. 3, August 1997, pp. 1160-1166.

[Osman y Kelly, 1996]

Osman, I. H. and Kelly, J. P. (Eds.). Meta-Heuristics: Theory and Applications. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 1996.

[Red HEUR, 2005]

Red Española de Procedimientos Metaheurísticos HEUR, Mayo 2005.
<http://heur.uv.es/ventana/descripcion.php>

[Refaey, Ghandakly y Azzoz, 1990]

W. M. Refaey, A. A. Ghandakly and M. Azzoz, I.Khalifa, O. Abdalla, "A Systematic Sensitivity Approach for Optimal Reactive Power Planning", IEEE Proceedings of Annual North American Power Symposium, October 1990, pp. 283-292.

[Revista enLinea 2005]

BUSQUEDA TABU: Un Procedimiento Heurístico para Solucionar Problemas de Optimización Combinatoria
<http://www.azc.uam.mx/publicaciones/enlinea2/1-3est.htm>

[Saadat, 2002]

Saadat, H., "*Power Systems Analysis*", Segunda ed., McGraw Hill, 2002.

[Santoso y Tan, 1990]

N. Iwan Santoso and Owen T. Tan, "Neural-Net Based Real-Time Control of Capacitors Installed on Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, Jan. 1990, pp. 266-272.

[Sochuliakova, Niebur y Richardson, 1991]

D. Sochuliakova, D. Niebur and D. Richardson, "Identification of Capacitor Position in a Radial System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1991, pp. 1368-1373.

[Song e Irving 2001]

Song Y. H., Irving M. R., "Optimization Techniques for electrical power systems: Part 2 Heuristic optimization methods", Power Engineering Journal, pp. 151-160 , June 2001.

[Su y Lee 2002]

Ching-Tzong Su; Chu-Sheng Lee, "Modified differential evolution method for capacitor placement of distribution systems" Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Vol. 1 , pp 208 – 213, October 2002.

[Sundhararajan y Pahwa, 1994]

S. Sundhararajan and A. Pahwa, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994, pp. 1499-1505.

[Taha 1998]

Hamdy A. Taha, "Investigación de Operaciones, una introducción", Sexta edición, Ed. Prentice Hall, México, 1998, pp. 216.

Apéndice A

Datos del sistema de 69 nodos

El sistema de prueba es un sistema radial de 69 nodos, que incluye un alimentador principal y siete laterales que se encuentra en [Baran y Wu 1989], como se muestra en la figura B.1.

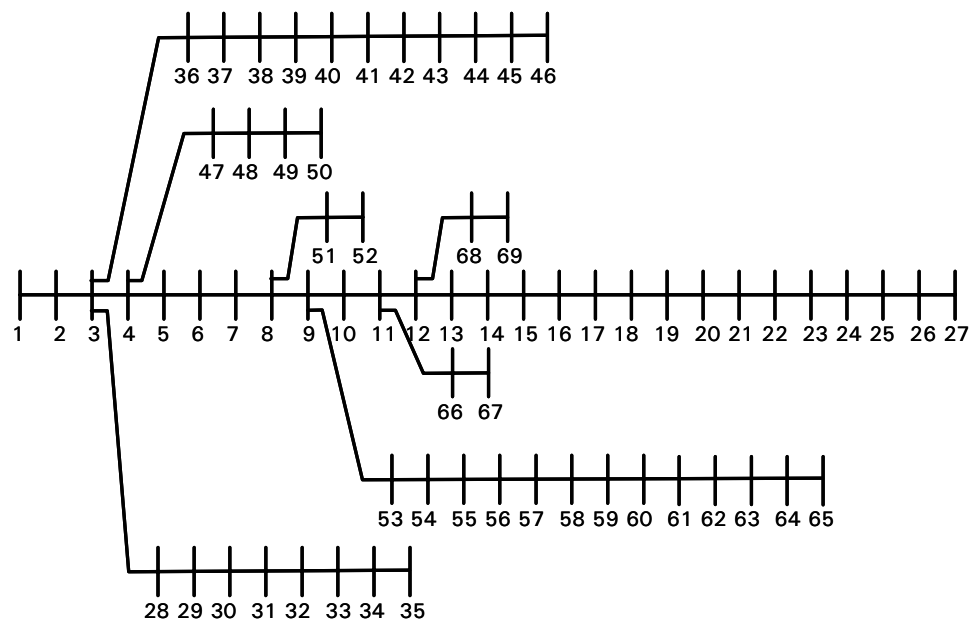


Figura B.1. Sistema radial de 60 nodos.

Los datos de carga del sistema también se pueden encontrar en la misma referencia.

Nodo envío	Nodo Recepción	Impedancia de la Línea		Carga en Nodo de Recepción		Nodo envío	Nodo Recepción	Impedancia de la Línea		Carga en Nodo de Recepción	
		R(Ω)	X(Ω)	P (KW)	Q(KVAR)			R(Ω)	X(Ω)	P (KW)	Q(KVAR)
1	2	0.0005	0.0012	0.0	0.0	40	41	0.7283	0.8509	1.20	1.0
2	3	0.0005	0.0012	0.0	0.0	41	42	0.3100	0.3623	0.0	0.0
3	4	0.0015	0.0036	0.0	0.0	42	43	0.0410	0.0478	6.0	4.30
4	5	0.0251	0.0294	0.0	0.0	43	44	0.0092	0.0116	0.0	0.0
5	6	0.3360	0.1846	2.60	2.20	44	45	0.1089	0.1373	39.220	26.30
6	7	0.3811	0.1941	40.40	30.0	45	46	0.0009	0.0012	39.220	26.30
7	8	0.0922	0.0470	75.0	54.0	4	47	0.0034	0.0084	0.0	0.0
8	9	0.0493	0.0251	30.0	22.0	47	48	0.0851	0.2083	79.0	56.40
9	10	0.8190	0.2707	28.0	19.0	48	49	0.2898	0.7091	384.70	274.50
10	11	0.1872	0.0619	145.0	104.0	49	50	0.0822	0.2011	384.70	274.50
11	12	0.7114	0.2351	145.0	104.0	8	51	0.0928	0.0473	40.50	28.30
12	13	1.0300	0.3400	8.0	5.50	51	52	0.3319	0.1114	3.60	2.70
13	14	1.0440	0.3450	8.0	5.50	9	53	0.1740	0.0886	4.350	3.50
14	15	1.0580	0.3496	0.0	0.0	53	54	0.2030	0.1034	26.40	19.0
15	16	0.1966	0.0650	45.50	30.0	54	55	0.2842	0.1447	24.0	17.20
16	17	0.3744	0.1238	60.0	35.0	55	56	0.2813	0.1433	0.0	0.0
17	18	0.0047	0.0016	60.0	35.0	56	57	1.5900	0.5337	0.0	0.0
18	19	0.3276	0.1083	0.0	0.0	57	58	0.7837	0.2630	0.0	0.0
19	20	0.2106	0.0696	1.0	0.60	58	59	0.3042	0.1006	100.0	72.0
20	21	0.3416	0.1129	114.00	81.0	59	60	0.3861	0.1172	0.0	0.0
21	22	0.0140	0.0046	5.30	3.50	60	61	0.5075	0.2585	1244.0	888.0
22	23	0.1591	0.0526	0.0	0.0	61	62	0.0974	0.0496	32.0	23.0
23	24	0.3463	0.1145	28.0	20.0	62	63	0.1450	0.0738	0.0	0.0
24	25	0.7488	0.2475	0.0	0.0	63	64	0.7105	0.3619	227.0	162.0
25	26	0.3089	0.1021	14.0	10.0	64	65	1.0410	0.5302	59.0	42.0
26	27	0.1732	0.0572	14.0	10.0	11	66	0.2012	0.0611	18.0	13.0
3	28	0.0044	0.0108	26.0	18.60	66	67	0.0047	0.0014	18.0	13.0
28	29	0.0640	0.1565	26.0	18.60	12	68	0.7394	0.2444	28.0	20.0
29	30	0.3978	0.1315	0.0	0.0	68	69	0.0047	0.0016	28.0	20.0
30	31	0.0702	0.0232	0.0	0.0	Voltaje de la Subestación (kV) = 12.66 KVA Base = 10 000 Voltaje Base (kV) = 12.66 Carga Total → P(KW) = 3802.19 → Q(KVAR) = 2694.60					
31	32	0.3510	0.1160	0.0	0.0						
32	33	0.8390	0.2816	14.0	10.0						
33	34	1.7080	0.5646	19.50	14.0						
34	35	1.4740	0.4873	6.0	4.0						
3	36	0.0044	0.0108	26.0	18.550						
36	37	0.0640	0.1565	26.0	18.550						
37	38	0.1053	0.1230	0.0	0.0						
38	39	0.0304	0.0355	24.0	17.0						
39	40	0.0018	0.0021	24.0	17.0						

