

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ MODIFICADO

RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS WITH MODIFIED TABU SEARCH ALGORITHM

Dionicio Zocimo Ñaupari Huatuco², Yuri Percy Molina Rodriguez¹, Kelly Winny Vidal Suarez²^{*}, Gerardo Junior Aquino Toccas²

¹Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa, Paraíba, Brazil

²Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Lima, Peru

Recibido (Received): 16 / 02 / 2022 Aceptado (Accepted): 04 / 08 / 2022

RESUMEN

Este artículo presenta un nuevo algoritmo para resolver el problema de reconfiguración de la red de distribución utilizando como base el algoritmo de Búsqueda Tabú. El método propuesto proporciona una forma de obtener nuevas soluciones y vecinos para el algoritmo Búsqueda Tabú con aleatoriedad controlada, diferente a lo que está disponible en la literatura. El método propuesto logra que el algoritmo produzca buenas soluciones en la mayoría de las iteraciones, realizando así un descenso suave y constante para obtener la solución final. El algoritmo busca reducir las pérdidas y mejorar el perfil de tensión en los sistemas de distribución de media tensión. Las pruebas se llevaron a cabo en dos sistemas utilizados en la literatura, el sistema de 33 barras y el de 94 barras. Los resultados de la simulación muestran que el método propuesto tiene un bajo costo computacional y obtiene hasta un 100% de soluciones óptimas en 100 ejecuciones.

Palabras Clave: Búsqueda Tabú, Reconfiguración de redes, Optimización, Pérdida del sistema de distribución

ABSTRACT

This work presents a new algorithm to solve the distribution network reconfiguration problem based on the Tabu Search algorithm. The proposed method provides a way to obtain new solutions and neighbors for the Tabu Search algorithm with controlled randomness, different from what is available in the literature. The proposed method manages to make the algorithm produce good solutions in most iterations, thus performing a smooth and constant descent to obtain the final solution. The algorithm seeks to reduce losses and improve the voltage profile in medium voltage distribution systems. Tests were carried out in two systems used in the literature, the 33-Bus and the 94-Bus systems. The simulation results show that the proposed method has a low computational cost and obtains up to 100% optimal solutions in 100 executions.

Keywords: Tabu Search, Network Reconfiguration, Optimization, Distribution System Loss

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna se ha basado cada vez más en la electricidad. La gran mayoría de los diversos dispositivos utilizados por la población y la industria actualmente funcionan con electricidad. Incluso los coches de combustión empiezan a perder espacio frente a los eléctricos. Por lo tanto, la sociedad requiere un sistema eléctrico moderno, eficiente, confiable, continuo, estable y de bajo costo. El sistema de energía eléctrica es el sistema que genera, transmite y distribuye energía a la sociedad. Para satisfacer tales demandas de la sociedad, se necesitan estudios.

Uno de los estudios que pueden realizar las empresas es la reconfiguración de las redes de distribución, con el fin de reducir pérdidas, mejorar el perfil de tensión, entre otros objetivos [14]. Los estudios de reconfiguración consisten en determinar el estado de los interruptores (abiertos o cerrados) para el seccionamiento e interconexión del sistema, obteniendo una configuración del sistema que minimice las pérdidas activas globales.

Además del objetivo principal, que es minimizar las pérdidas, el problema de la reconfiguración también tiene restricciones que se deben respetar. Las restricciones comúnmente adoptadas son mantener la topología radial del sistema, el límite de tensión de las barras, la capacidad de corriente en las ramas y la conexión de todas las cargas.

El problema de la reconfiguración es de naturaleza combinatoria, ya que depende del número de llaves

* Corresponding author.: Dionicio Zocimo Naupari H.
E-mail: znaupari@uni.edu.pe

existentes en el sistema. De esta forma, como una llave puede asumir dos estados, abierto o cerrado, para un sistema con n llaves el espacio de búsqueda, o sea el número de topologías radiales existentes es muy elevado. Por lo tanto, debido al alto costo computacional que implicaría el cálculo para probar un gran número de soluciones, existe la necesidad de utilizar técnicas y herramientas computacionales que reduzcan el número de soluciones a probar y encontrar una posible solución óptima o cercana a la óptima, con un costo informático bajo y asequible.

Entre estos métodos, se han destacado en la literatura las metaheurísticas. Según Glover [1], las metaheurísticas guían y modifican otras heurísticas, produciendo así mejores soluciones que las producidas por heurísticas comunes. La metaheurística de búsqueda tabú, propuesta por Glover [1, 2], es un algoritmo ampliamente utilizado en la literatura aplicado al problema de la reconfiguración.

Así, proponemos un algoritmo basado en la metaheurística de Búsqueda Tabú capaz de encontrar soluciones para dos sistemas de distribución diferentes utilizados en la literatura. Las principales aportaciones del método propuesto son:

- En este artículo se propuso un método de generación de vecindarios del algoritmo Búsqueda Tabú basado en un cambio por vecino, teniendo en cuenta la aleatoriedad, pero de forma controlada, de modo que se generen muchas buenas soluciones por iteración;
- El algoritmo propuesto mostró una buena convergencia, obteniendo soluciones globales en la mayoría de las ejecuciones;
- Los resultados muestran que el algoritmo es computacionalmente eficiente y garantiza la obtención de la solución óptima para el sistema.

2. ANTECEDENTES

El pionero en el estudio del problema de la Reconfiguración fue Merlin [3]. Propuso una heurística constructiva donde, a partir de una red mallada obtenida tras cerrar todos los conmutadores, se iniciaba una apertura secuencial teniendo en cuenta el criterio de minimización de pérdidas activas. Una limitación de la propuesta de Merlin, a pesar de su bajo costo computacional, es la incapacidad de encontrar soluciones óptimas de sistemas de tamaño mediano.

Civanlar y col. [4] propuso una técnica en la que la configuración inicial era radial en lugar de mallada. En el método, se evaluó el cambio en las pérdidas de energía activa debido al intercambio de cargas entre alimentadores. Este método se llamó Branch Swap. Este trabajo inspiró varios trabajos posteriores y marcó un hito en el estudio del problema de la reconfiguración.

A partir de la década de 2000, predomina el uso de métodos heurísticos basados en modelos físicos o biológicos en la resolución del problema de reconfiguración, destacando el uso de metaheurísticas [5]. Entre las metaheurísticas, se ha demostrado que el método de búsqueda tabú es eficaz para resolver varios problemas de optimización [15].

Abdelaziz et al. [6] propuso un método de búsqueda tabú modificado para realizar la reconfiguración. Las propuestas consisten en utilizar una lista tabú de longitud variable, así como un nuevo método de movimiento, denominado multiplicador, para diversificar la búsqueda en regiones inexploradas.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta sección, se explicará la teoría de la reconfiguración de la red de distribución y el algoritmo clásico de búsqueda tabú.

3.1 Problema de Reconfiguración de Redes de Distribución

La reconfiguración utiliza la red de distribución existente y consiste en determinar el estado de las llaves de seccionamiento e interconexión presentes en el sistema.

El problema de reconfiguración es un problema de minimización en el que hay una función objetivo que se debe minimizar y limitaciones que se deben atender. La función de optimización utilizada en este trabajo son las pérdidas activas en las líneas (conductores) del sistema.

3.1.1 Función Objetivo

La función objetivo del problema de reconfiguración es minimizar las pérdidas del sistema dadas por:

$$f(s) = \sum_{l=1}^{N_l} r_l * i_l^2 \quad (1)$$

Donde $f(s)$ es la suma de todas las pérdidas activas en los conductores del sistema de distribución; N_l es el número de ramas del sistema; r_l es la resistencia de la línea l ; i_l es la corriente que pasa por la línea l y s es la solución para el sistema con algunos interruptores abiertos y algunos interruptores cerrados.

3.1.2 Restricciones de Tensión

La tensión en las barras del sistema debe satisfacer los límites máximo y mínimo, de la siguiente manera:

$$E_{min} \leq |E_k| \leq E_{max}, \quad (2)$$

Onde E_{min} e E_{max} são os valores de tensões mínima e máxima, respectivamente, que podem ser permitidas para uma barra k .

Donde E_{min} y E_{max} son los valores de las tensiones mínimo y máximo, respectivamente, que se pueden permitir para una barra k .

3.1.3 Restricciones de corriente

La restricción del límite de corrientes en las líneas se debe a las características técnicas de las líneas presentes en el sistema de distribución. La corriente que pasa a través de una línea (i_i) no puede exceder la corriente máxima admitida por esa línea (i_i^{max}), como en:

$$|i_i| \leq i_i^{max} \quad (3)$$

3.1.4 Restricción de Topología Radial

Las operaciones de apertura y cierre de los interruptores del sistema deben realizarse de forma que el sistema permanezca radial. Una topología radial es un sistema conexo y que no tiene lazos y, por lo tanto, todas las cargas están conectadas con la subestación. Las condiciones utilizadas en este trabajo para mantener la topología radial se toman del trabajo de Lavorato et al. [7] y se resume a continuación:

- Condición 1: la solución debe tener $A = n_b - n_{bs}$; donde A es el número de ramas activas, n_b es el número de nodos en el sistema y n_{bs} es el número de nodos de subestación en el sistema;

- Condición 2: el sistema debe estar conectado. Esto implica que además de que el sistema debe estar conectado a alguna subestación, se deben atender todas las cargas.

3.2 Algoritmo Clásico de Búsqueda Tabu

El algoritmo de búsqueda Tabu fue propuesto por Fred Glover [1,2] y, de forma simplificada, es una técnica iterativa que explora un conjunto de soluciones X de un problema, realizando movimientos desde una solución x a otra solución x' ubicada en la vecindad $N(x)$ [8].

Los movimientos mencionados se realizan con el fin de llegar a una solución considerada buena, teniendo en cuenta alguna función $f(s)$ a minimizar o maximizar [1,2]. Los algoritmos de búsqueda tabu resuelven problemas del siguiente modelo:

minimizar $f(x)$

sujeto a: $x \in X$

Donde x es una solución posible, $f(x)$ es la función objetivo de acuerdo con la solución x y X es el espacio de búsqueda. Los problemas de optimización suelen tener limitaciones que cumplir. Antes de explicar el algoritmo en sí, es interesante definir sus conceptos básicos, tomados de [9]:

- Solución actual: es una posible solución para el sistema;
- Movimiento: mecanismo para generar una nueva solución a partir de la solución actual;
- Vecindad: conjunto de soluciones vecinas generadas a partir de la solución actual utilizando el mecanismo de movimiento;
- Lista tabú: lista de los atributos de los últimos movimientos realizados cuya ejecución está prohibida durante T iteraciones. La presencia de la lista de tabú evita las repeticiones de soluciones;
- Criterios de aspiración: criterios para una solución que contenga movimientos prohibidos por la lista tabú para ser adoptados como la solución actual. Si el vecino es la mejor solución jamás encontrada por el algoritmo, pero esta solución se encuentra en la lista tabú, se puede elegir como la solución actual.

Con los conceptos vistos anteriormente, es posible comprender el algoritmo, que se explica a continuación. Comience con una solución inicial que cumpla con las restricciones. A partir de esta solución, con el mecanismo de movimiento, se crea una vecindad con varias soluciones vecinas; compruebe que dichos vecinos cumplan con las restricciones. Si el mejor vecino (según la función de optimización) no tiene movimientos en la lista de tabú o cumple con los criterios de aspiración, esta será la nueva solución actual del algoritmo. Si el vecino está en la lista tabú pero no cumple con los criterios de aspiración, reinicie la prueba para el segundo vecino en adelante hasta que encuentre un vecino que no tenga sus movimientos en la lista tabú. Con la nueva solución actual elegida, agregue los movimientos de esa nueva solución a la Lista tabú. Luego se lleva a cabo una prueba para ver si esta fue la mejor solución jamás encontrada por el sistema; Si es así, esta solución se guarda como S_{Best} , su función de aptitud como F_{Best} y el número de iteración como $Iter_{Best}$. El algoritmo se detiene cuando se ejecuta un cierto número de iteraciones sin actualizar en S_{Best} .

4. METODOLOGÍA

Antes de explicar el algoritmo utilizado en este trabajo, es interesante comentar sobre el software OpenDSS. OpenDSS es una herramienta de cálculo de flujo de potencia que permite ser controlado por diferentes plataformas, como Python, C #, MATLAB, Microsoft Office, entre otras [5]. OpenDSS utiliza dos algoritmos capaces de resolver el flujo de potencia: el método de

inyección de corriente y el método de Newton. En este trabajo, todos los datos relacionados con el flujo de potencia, como tensiones, potencias, corrientes, entre otros, provienen del OpenDSS.

4.1 Propuesta de Vecindad con aleatoriedad controlada

La clave para la buena generación de vecindarios es el mecanismo de movimiento. Es el mecanismo de movimiento que realmente genera los vecinos de una solución actual. Este mecanismo debe ser eficiente para que los vecinos generados sean siempre o casi siempre buenos para que el algoritmo siga avanzando. Chiang y Jumeau [10] propusieron y varios otros autores [6, 11] utilizaron un mecanismo llamado *Add/Subtract* para generar vecinos. A diferencia de *Add/Subtract*, que enfatiza la aleatoriedad incontrolada, el algoritmo propuesto tiene un método de control de aleatoriedad.

En primer lugar, es interesante traer las variables que se utilizarán a partir de ahora. M es el número de dimensiones del sistema, es decir, cuántas mallas independientes se forman cuando todas las llaves están cerradas; Ω_x es el conjunto de llaves pertenecientes a la malla X , después de cerrar todas las llaves abiertas. Cada conjunto de claves contiene todas las claves de interconexión y sección que pertenecen a esa malla X . En estos conjuntos las llaves se organizan según su posición geográfica, lo que significa que las ramas físicamente vecinas también son vecinas en el conjunto de llaves.

Luego, comenzando con una solución radial S , la posición clave del primer bucle se encuentra en el conjunto de claves Ω_1 . Luego, la nueva llave a abrir será sorteada aleatoriamente entre las llaves permitidas por el valor de la variable N_{Sorteo} . Esta variable, establecida por el usuario del algoritmo, es la variable que dice cuántas llaves vecinas izquierda y derecha de la llave actual pueden estar disponibles mediante el sorteo aleatorio informado anteriormente. Es decir, si el valor de N_{Sorteo} es 3, entonces las 3 llaves a la izquierda y las 3 llaves a la derecha de la tecla seleccionada están disponibles para ser elegidas aleatoriamente para formar el nuevo vecino. Esta es una forma de controlar la aleatoriedad, ya que en el método *Add/Subtract*, por ejemplo, el sorteo ocurriría en toda la malla. Luego, después del sorteo y la selección de la nueva llave, se cierra la llave inicialmente abierta y se forma el primer vecino.

Para el segundo vecino, la lógica utilizada es la misma, sin embargo, la solución actual S sigue siendo la misma que la utilizada en el proceso del primer vecino. Los

vecinos son independientes entre sí. Por tanto, para obtener el segundo vecino, la malla a utilizar será la segunda malla, Ω_2 . Para el resto de vecinos, la lógica es la misma, hasta que se generan M vecinos, uno correspondiente a cada malla independiente del sistema.

4.2 Aplicación del método propuesto

Para aplicar el método propuesto se deben seguir los siguientes pasos:

- A. En este paso, se agregan los datos del sistema como cargas, líneas, interruptores, etc. Las variables BT_{Max} (número máximo de iteraciones sin mejora), T (tamaño de la lista tabú), Max_{Iter} (número máximo de iteraciones) y N_{Sorteo} (número de llaves vecinas que participan en el sorteo);
- B. Se inicia el ciclo de iteración. $Iter = Iter + 1$. Se genera el vecindario, así como su *fitness*. $Iter$ es el contador de iteraciones y el *fitness* es el valor de pérdida activa del sistema con esa topología;
- C. La vecindad se ordena en orden ascendente según el *fitness* de cada vecino. Se selecciona el mejor vecino;
- D. Si este vecino es la mejor solución jamás encontrada, la nueva solución S es ese vecino (criterio de aspiración); si no, el vecino se comparará con la lista de tabú. Si sus movimientos no están en la lista tabú, es la nueva solución S . Si sus movimientos están en la lista tabú, la prueba se realiza nuevamente con el segundo vecino hasta que se encuentra un vecino que no tiene movimientos en la lista tabú. Con la nueva solución S elegida, la lista de tabú se actualiza;
- E. Si esa solución S es la mejor solución jamás encontrada, guárdela como S_{Best} (la mejor solución jamás encontrada), guarde el *fitness* como Fit_{Best} (el mejor *fitness* jamás encontrado) y guarde el número de iteración como $Iter_{Best}$ (la mejor solución jamás encontrada);
- F. Compruebe los criterios de parada: si $(Iter - Iter_{Best})$ es mayor que BT_{Max} , o si $Iter$ alcanza el valor de $Iter_{Max}$, detener la ejecución y vaya al paso G. De lo contrario, vaya al paso B;
- G. Muestra los resultados: la mejor solución encontrada, el *fitness* y las tensiones máximas y mínimas encontradas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, el algoritmo se aplica a dos sistemas de distribución utilizados en la literatura técnica. Los parámetros requeridos para ambos sistemas son BT_{Max} , T , $Iter_{Max}$ y N_{Sorteo} .

5.1 Sistema 33-Barras

El sistema de 33 barras de Baran y Wu [12] tiene 37 ramales, 32 interruptores de desconexión (normalmente cerrados) y 5 interruptores de interconexión (normalmente abiertos). Con todas las llaves cerradas, el sistema forma 5 mallas independientes. La tensión en la subestación es de

12,66 kV. El sistema está dispuesto en la Fig. 1, donde las llaves de seccionamiento s_1 a s_{32} están representadas por líneas continuas, mientras que las llaves de interconexión, s_{33} a s_{37} , por líneas discontinuas. El sistema tiene 202,63 kW de pérdidas activas antes de la reconfiguración.

TABLA I
Resultados que varían BT_{Max} , T y N_{Sorteo} en 100 ejecuciones para el sistema de 33-Barras.

BT_{Max}	T	N_{Sorteo}	Promedio de pérdidas (kW)	Desviación estándar (kW)	Peor solución	Pérdidas (kW)	Nº de soluciones globales
5	2	1	139.69	0.6818	s33, s28, s11, s32, s34	143.72	94
5	2	3	141.75	2.4785	s33, s27, s10, s32, s34	149.00	43
5	5	1	139.72	0.8162	s33, s28, s11, s32, s34	143.72	96
5	5	3	141.61	2.4781	s33, s27, s10, s32, s34	149.00	44
10	2	1	139.56	0	-	-	100
10	2	3	140.41	1.6680	s33, s28, s10, s32, s34	145.92	71
10	5	1	139.59	0.4146	s33, s28, s11, s32, s34	143.72	99
10	5	3	140.47	1.8513	s33, s26, s11, s32, s34	149.90	72

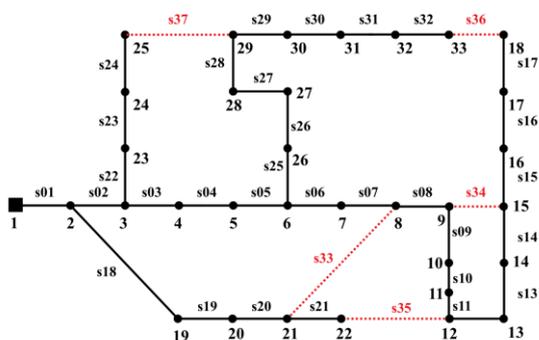


Fig. 1. Diagrama unifilar del sistema de 33-Barras.

La solución óptima encontrada por el algoritmo propuesto fue abrir las llaves s_{07} , s_{09} , s_{14} , s_{32} y s_{37} y mantener las demás cerradas. Las pérdidas que logra esta solución son de 139,56 kW y representan una reducción del 31,12% respecto a las pérdidas antes de la reconfiguración, el tiempo medio para realizar un ensayo fue de 0,5 segundos. Para validar el método propuesto, se realizaron pruebas con combinaciones entre BT_{Max} , T y N_{Sorteo} . Como se puede ver en la Tabla I, cuanto mayor sea el BT_{Max} o la T , mayor será el éxito del algoritmo, alcanzando el 100% o casi el 100% de éxito para 100 ejecuciones. Sin embargo, para N_{Sorteo} , que es la variable de movimiento, cuanto mayor sea su valor, peores serán los resultados.

5.2 Sistema 94-Barras

El sistema de 94-Barras de Su y Lee [13] es un sistema taiwanés real con tensión de 11,4 kV, 11 alimentadores, DOI: <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i1.1447>

83 seccionadores (normalmente cerrados), de s_1 a s_{83} y 13 interruptores de interconexión (normalmente abiertos), de s_{84} a s_{96} . Se forman trece mallas independientes cuando todos los interruptores del sistema están cerrados. Antes de la reconfiguración, el sistema tiene 352 kW de pérdidas activas. El sistema se muestra en la Fig. 2, donde las llaves seccionadoras están representadas por líneas negras continuas y los interruptores de interconexión están representados por líneas rojas discontinuas.

La mejor solución encontrada por el algoritmo fue abrir las llaves s_7 , s_{13} , s_{34} , s_{39} , s_{42} , s_{55} , s_{62} , s_{72} , s_{83} , s_{86} , s_{89} , s_{90} y s_{92} , manteniendo los demás cerrados. Esta configuración produce pérdidas de 470,67 kW, lo que supone una reducción del 11,53% en comparación con la configuración anterior a la reconfiguración, el tiempo medio para realizar un ensayo fue de 1,4 segundos. Para validar el método propuesto, se realizaron pruebas con combinaciones entre BT_{Max} , T y N_{Sorteo} . Como se puede observar en la Tabla II, cuanto mayor sea el BT_{Max} o la T , mayor será el éxito del algoritmo, alcanzando el 100% o casi el 100% de éxito para 100 ejecuciones. Sin embargo, para N_{Sorteo} , que es la variable de movimiento, cuanto mayor sea su valor, peores serán los resultados.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se propuso un método para resolver el problema de reconfiguración del sistema de distribución utilizando la metaheurística de Búsqueda Tabú. De esta forma, se propuso un mecanismo de

generación de soluciones y, en consecuencia, la vecindad.

- La literatura técnica está llena de propuestas de algoritmos con mucha aleatoriedad que, al final, generan muchas soluciones de mala calidad que se descartan, pero que generan costo computacional elevado. El algoritmo propuesto controla la aleatoriedad para que el algoritmo haga un avance suave y descendente a lo largo de su ejecución.

- Los resultados de las simulaciones fueron prometedores y muestran que el método propuesto es efectivo y garantiza la obtención de buenas soluciones para los sistemas de distribución. El método fue probado en dos sistemas ampliamente utilizados en la literatura y obtuvo hasta un 100% de efectividad en ambos.

TABLA II
Resultados que varían BT_{Max} , T y N_{Sorteo} en 100 ejecuciones para el sistema de 33-Barras.

BT_{Max}	T	N_{Sorteo}	Promedio de pérdidas (kW)	Desviación estándar (kW)	Peor solución	Pérdidas (kW)	Nº de soluciones globales
5	5	1	470.67	0.034	s63, s13, s83, s72, s89, s34, s42, s39, s92, s90, s84, s7, s86	470.87	97
5	5	3	471.60	4.6047	s96, s13, s83, s72, s89, s34, s42, s39, s92, s90, s84, s85, s86	503.40	47
5	10	1	470.80	1.3025	s96, s13, s83, s72, s89, s34, s42, s39, s92, s90, s84, s7, s86	483.76	98
5	10	3	473.20	8.2647	s96, s88, s83, s87, s89, s33, s42, s39, s92, s90, s84, s85, s86	508.46	52
10	5	1	470.67	0	-	-	100
10	5	3	471.37	4.5778	s96, s13, s83, s72, s89, s34, s42, s39, s92, s90, s84, s85, s86	503.40	79
10	10	1	470.67	0	-	-	100
10	10	3	471.37	4.5771	s96, s13, s83, s72, s89, s34, s42, s39, s92, s90, s84, s85, s86	503.40	77

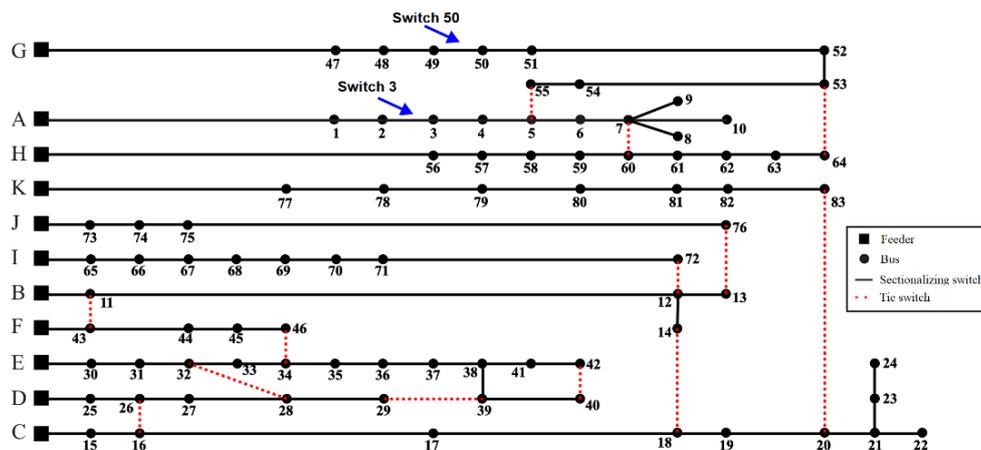


Fig. 2. Diagrama unifilar del sistema de 94-Barras.

REFERENCIAS

[1] Glover, F. "Tabu search—part I.", *ORSA Journal on computing* 1.3 pp. 190-206, 1989, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>.

[2] Glover, F. "Tabu search—part II." *ORSA Journal on computing* 2.1, pp. 4-32, 1990.

[3] Merlin, A., y H. Back. "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system." *Proc. of 5th PSCC*, 1975 vol. 1, pp. 1-18, 1975.

[4] Civanlar, Seyhan, et al. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction.", *IEEE Transactions on Power Delivery* 3.3, pp. 1217-1223, 1988.

[5] Pegado, Raoni de Araújo. "Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando otimização por enxame de partículas aprimorado.", tesis de posgrado en Ingeniería eléctrica, Universidade Federal da Paraíba, Brazil, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/17174>

[6] Abdelaziz, A., et al. "Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm.", *Electric Power Systems Research* 80.8, pp. 943-953, 2010.

[7] Lavorato, M., et al. "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems.", *IEEE Transactions on Power Systems* 27.1, 172-180, 2012.

[8] Gomes, A., "Uma introdução à busca tabu." Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, SP, Brasil. [En línea]. Disponible en: <http://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/AndreBuscaTabu.pdf>, 2009.

- [9] Al-Sultan, K. S., "A tabu search approach to the clustering problem.", *Pattern recognition* 28.9, pp. 1443-1451, 1995.
- [10] Chiang, H-D., and Rene Jean-Jumeau. "Optimal network reconfigurations in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results.", *IEEE transactions on Power delivery* 5.3, pp. 1568-1574, 1990.
- [11] Jeon, Young-Jae, y Jae-Chul Kim., "Network reconfiguration in radial distribution system using simulated annealing and tabu search.", *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*. vol. 4. IEEE, 2000.
- [12] Baran, Mesut E., y Felix F. Wu., "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing.", *IEEE Power Engineering Review* 9.4, pp. 101-102, 1989
- [13] Su, Ching-Tzong, y Chu-Sheng Lee., "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution.", *IEEE Transactions on power delivery* 18.3 pp. 1022-1027, 2003.
- [14] J. F. Franco, et. al, "A Mixed-Integer LP Model for the Reconfiguration of Radial Electric Distribution Systems Considering Distributed Generation", *Electric Power Systems Research*, vol. 97, pp. 51-60, abr. 2013.
- [15] J. F. Franco, et. al, "An Efficient Implementation of Tabu Search in Feeder Reconfiguration of Distribution Systems", en *Proceedings of the 2012 Power Engineering Society General Meeting*, San Diego, California, USA, jul 22-26, 2012, pp. 01-08.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe