



## Programa para la ejecución de la reconfiguración de alimentadores de distribución primaria

Yoel R. Rosales  
Michel Zamora

Recibido: Septiembre del 2004  
Aprobado: Noviembre del 2004

### Resumen / Abstract

La reconfiguración en las redes de distribución primaria se ejecuta mediante la operación de interruptores normalmente abiertos y normalmente cerrados, manteniendo siempre una topología radial, y uno de sus objetivos es disminuir las pérdidas totales de la red donde se aplique. Se presenta un programa en desarrollo con una interfaz muy amigable y funciones que permiten calcular la reconfiguración óptima para alcanzar el estado de pérdidas mínimas en cualquier circuito de distribución primaria modelado. Su algoritmo de cálculo está basado en un método heurístico muy sencillo y atractivo para programar, el lenguaje de programación utilizado es el Borland Delphi versión 5. Este resultado puede constituir una útil herramienta para el estudio de las redes primarias durante su planificación y explotación.

Palabras clave: reconfiguración, optimización, heurístico, distribución.

*The reconfiguration of primary distribution networks is run by means of normally open and normally closed switches. It keeps radial topology and aims at lowering losses on the network where it is being run. This paper includes an undergoing program which has an interactive interface and functions enabling an optimum reconfiguration. This program allows to know the minimum losses at any represented primary distribution circuit and may become a useful tool for the study of primary networks being planned or used. Its calculation algorithm is based on an easy-to-program heuristic method. The programming language used was Borland Delphi 5.*

*Key words:* reconfiguration, optimization, heuristic, distribution

### INTRODUCCIÓN

Los circuitos de distribución tienen un número de interruptores normalmente abiertos (enlaces) y normalmente cerrados (seccionalizadores), cambiando el estado de un par de estos se puede transferir carga de un alimentador a otro y a su vez cambiar las potencias transferidas por las secciones y lograr que las pérdidas totales del circuito disminuyan. También, cuando ocurre una falla en alguna sección o tramo del circuito es necesario aislarla y para ello se abre el seccionalizador que corresponda y se cierra el enlace que permita reestablecer la energía en los nodos donde

es posible, dichos cambios deben regirse bajo el principio de mantener la estructura radial del circuito de distribución primaria. Estas dos operaciones forman parte de una importante área en el manejo y explotación de una red de distribución primaria, la reconfiguración.

Debido al número de interruptores que puede tener un circuito real, la cantidad de opciones de conmutación de enlaces y seccionalizadores, que surge al pretender reconfigurarlo para disminuir sus pérdidas, es apreciablemente grande. Por eso, la decisión a tomar

por parte de un despachador en cuanto a la reconfiguración se convierte en una situación compleja.

Con el objetivo de resolver ese problema han surgido innumerables algoritmos de reconfiguración. Aoki y otros,<sup>1,2</sup> usan una técnica de programación no lineal para minimizar las pérdidas. El método descrito por D. Chirmohamandi y H. W. Hong<sup>3</sup> alcanza la óptima configuración mediante el siguiente proceso: Se cierran todos los enlaces formándose una red mallada, luego se calcula un flujo de potencia en el circuito y se abren los seccionadores donde circulan las menores corrientes, de manera que se alcance finalmente una estructura radial donde las pérdidas sean mínimas. Civanlar y otros<sup>4</sup> proponen un procedimiento de solución para la reducción de pérdidas muy práctico computacionalmente, una sencilla fórmula es presentada y se basa en simplificaciones asumidas por el autor que permiten calcular la reducción de pérdidas como resultado de la transferencia de carga de un alimentador a otro. Más recientemente han surgido técnicas de optimización combinatorias basadas en la simulación del enfriamiento de los metales para encontrar la topología óptima.<sup>5</sup>

En Cuba, el control de las redes de distribución se realiza mediante los despachos territoriales y de distribución, y es en estos centros donde se determina la configuración que deben adoptar los circuitos ante determinadas condiciones de carga y las decisiones que se toman respecto a este tema son basadas en análisis empíricos y en la gran experiencia acumulada por los operadores del sistema.

El trabajo tiene como objetivo: Aportar a la automatización de los sistemas de análisis y cálculo en los centros de despacho utilizando un algoritmo de cálculo basado en el método heurístico propuesto por S. Civanlar,<sup>4</sup> con el cuál se logra conocer cual es la mejor opción de cambio de estado en los interruptores para alcanzar las menores pérdidas en un circuito en régimen de operación normal.

## DESARROLLO

### Algoritmo de reconfiguración

Primeramente es necesario definir que la reconfiguración en un circuito de distribución se puede ejecutar en 2 regímenes de operación diferentes:

1. Régimen de operación normal.
2. Régimen posavería (restauración).

La reconfiguración en estado de operación normal se plantea como principal objetivo la optimización de la topología de la red buscando las menores pérdidas de potencia en todo el circuito. Por otro lado, la reconfiguración en posavería o restauración se basa en hallar la topología óptima que permita restaurar la

energía en la mayor cantidad de nodos afectados por la falla sin que se violen las restricciones impuestas al circuito en cuanto a límites de voltajes en los nodos y corrientes máximas por los conductores. El programa que se presenta en el trabajo realiza la reconfiguración de cualquier circuito de distribución primaria para régimen de operación normal.

El algoritmo se basa en el intercambio de ramas, manteniendo la radialidad del circuito. Consiste en cerrar un enlace y buscar el seccionador que debe abrirse. Esta búsqueda se realiza mediante dos reglas heurísticas: a) cuando se considera la apertura de un enlace es necesario transferir la carga desde el lado con mayor caída de tensión al lado con la caída de tensión más baja, tomando como referencia a la subestación; b) solo es posible una reducción de pérdidas si existe una sustancial caída de tensión a través del enlace. Mediante este procedimiento se escogen las opciones de interrupción que reducen pérdidas, los valores de reducción de pérdidas para cada opción interruptiva se calculan a través de la siguiente expresión:

$$\Delta P = R_e \left\{ 2 \left( \sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{lazo} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad \dots(1)$$

donde:

**D:** Conjunto de nodos que se desconectan de un alimentador para conectarse a otro.

**M:** Nodo del interruptor de enlace del lado que pertenece al alimentador que se ocupará de la nueva carga.

**N:** Nodo del interruptor de enlace del lado que pertenece al alimentador que liberará la carga.

$I_i$ : Corriente compleja del nodo  $i$ .

$R_{lazo}$ : Resistencia serie de la trayectoria entre las dos subestaciones involucradas a través del interruptor de enlace operado.

$E_m$ : Elemento del vector  $(E) = (R_{bus})(I_{bus})$  que se corresponde con el nodo  $m$ .

$(R_{bus})$ : Matriz resistencia del alimentador al cual pertenece el nodo  $m$ ,

$(I_{bus})$ : Vector de las corrientes de nodo del alimentador al cual pertenece el nodo  $m$ .

$E_n$ : Es similar a  $E_m$  pero para el alimentador al cual pertenece el nodo  $n$ .

Los valores de  $E_m$  y  $E_n$  se deben calcular previo a cualquier análisis de reconfiguración, mediante una corrida de flujo de carga al circuito inicial y solo es

necesario calcular estos valores de voltaje en los nodos extremos de cada interruptor de enlace.

$\Delta P$ : Representa la variación de pérdidas: Si  $\Delta P < 0$  entonces como resultado de la transferencia de carga hubo una reducción de pérdidas, si  $\Delta P > 0$  entonces es lo contrario.

### Características de la aplicación

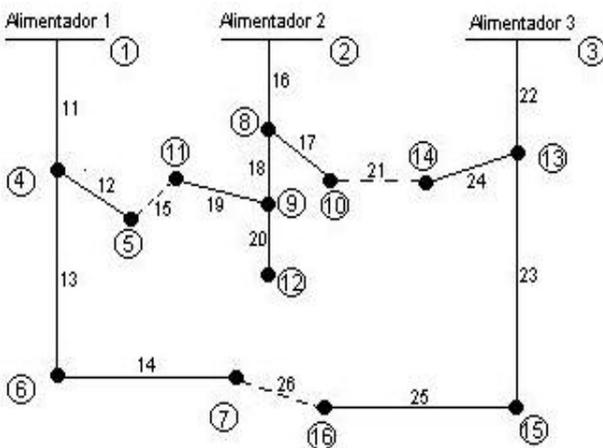
La aplicación fue creada empleando el lenguaje de programación Borland Delphi versión 5. Ofrece grandes facilidades y flexibilidad para la entrada de datos y posee una interfaz muy amigable e intuitiva para el usuario. Consta de 3 ventanas: La principal y dos de resultados.

En la ventana principal el usuario dibuja el circuito con su topología inicial, introduce los datos necesarios de los elementos del circuito, ejecuta una corrida de flujo del circuito original y por último realiza los cálculos para optimizar la reconfiguración de la red. El resto de las ventanas muestran los resultados de los cálculos del flujo de carga y de la optimización.

### Ejemplo numérico

El circuito que se utiliza para reconfigurar es el mismo, citado en la referencia 4 y su esquema monolineal reducido es el de la figura 1.

El circuito objeto de estudio cuenta con 3 alimentadores, 16 nodos y 3 enlaces que se representan con las líneas discontinuas. Se impone la condición de que el circuito es balanceado y que además existen seccionizadores instalados en todas las secciones o tramos, esto último permite encontrar



Esquema monolineal reducido del circuito de distribución que se le aplica la reconfiguración.<sup>4</sup>

la opción interruptiva óptima entre todas las posibles. Todos los tramos, enlaces y nodos están enumerados con el objetivo de identificarlos durante el proceso de cálculo y para mostrar los resultados.

Los datos del circuito se muestran en la tabla 1. Base: 100MVA, 23 kV.

Tabla 1  
Datos de nodos y líneas del circuito ejemplo

Nodo Ini.-Fin.	R (pu)	X (pu)	P (MW) en nodo Fin.	Q (MVAR) en nodo Fin.	Cap. (MVAR) en nodo Fin.
1-4	0,075	0,1	2	1,6	
4-5	0,8	0,11	3	1,5	1,1
4-6	0,09	0,18	2	0,8	1,2
6-7	0,04	0,04	1,5	1,2	
2-8	0,11	0,11	4	2,7	
8-9	0,08	0,11	5	3	1,2
8-10	0,11	0,11	1	0,9	
9-11	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
9-12	0,08	0,11	4,5	2	3,7
3-13	0,11	0,11	1	0,9	
13-14	0,09	0,12	1	0,7	1,8
13-15	0,08	0,11	1	0,9	
15-16	0,04	0,04	2,1	1	1,8
5-11	0,04	0,04			
10-14	0,04	0,04			
7-16	0,09	0,12			

### Entrada de datos

La figura 2 muestra la pantalla principal del programa donde se grafica el circuito a estudiar y se introducen los datos necesarios para realizar los cálculos.

La ventana principal está formada por los siguientes elementos:

1. Tapiz o zona de dibujo.
2. Circuito con sus componentes dibujados .
3. Editor de datos del circuito.
4. Registro de datos de tramos y nodos del circuito.
5. Herramienta para el dibujo de transformadores de en la subestación.

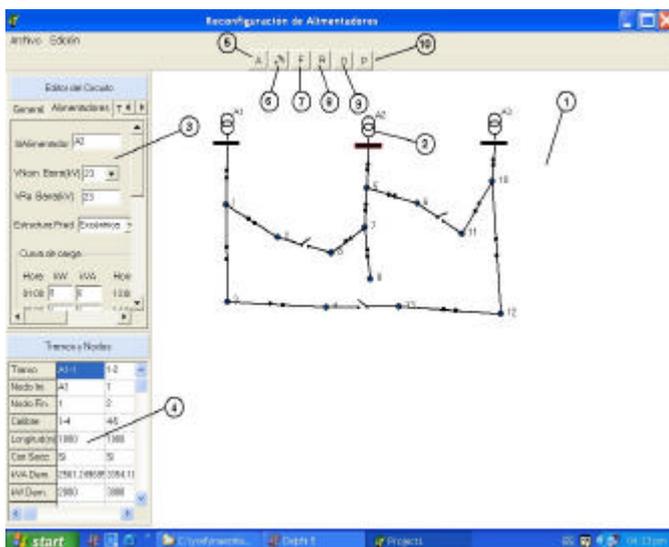
6. Herramienta para el dibujo de los tramos.
7. Botón para calcular corrida de flujo en todo el circuito.
8. Botón para mostrar los resultados del flujo.
9. Botón para calcular la reconfiguración óptima.
10. Botón para mostrar los resultados de la reconfiguración.

Empleando las herramientas 5, 6 y un menú emergente asociado a cada uno de los nodos se grafica de manera muy sencilla cada uno de los transformadores, tramos, enlaces y seccionalizadores que forman parte del circuito. Una vez terminada esta etapa, se trabaja con el editor del circuito para introducir los datos de los elementos dibujados: Potencia reactiva y activa de cada nodo, longitud y calibre de los tramos, voltaje en la barra de las subestaciones, etcétera.

### Cálculo del flujo de carga

Luego de la entrada de los datos se procede a calcular un flujo de carga con el objetivo de conocer los voltajes en los nodos, las transferencias de potencias por las ramas, las pérdidas de potencia activa totales y otros resultados que permiten caracterizar las condiciones iniciales del circuito que se pretende reconfigurar. Presionando el botón de corrida del flujo (6) se realizan los cálculos y se muestran los resultados al hacer clic sobre el botón de mostrar resultados del flujo (8). Los resultados del flujo de carga para el caso estudiado se muestran en la figura 3.

El resultado del flujo refleja que el valor de las pérdidas totales es de 534,811 kW.



Ventana principal del programa.

Tramo	Pnodo	Pnodo	dP	Dnodo	Dnodo	dD	Ue	Uv	dU	Pdenom	Pdenom
A1-1	6500.582	6520.416	19.834	2915.410	2934.777	19.367	23.000	22.70543	0.29457	2000.000	1800.000
1-2	3017.328	3000.000	-17.328	-410.076	-400.000	-10.076	22.70540	22.71818	0.01278	3000.000	1500.000
1-3	3512.088	3501.476	-10.612	824.701	801.476	-23.225	22.70540	22.67788	-0.02752	2000.000	800.000
3-4	1501.476	1500.000	-1.476	1201.476	1200.000	-1.476	22.67790	22.65288	-0.02502	1500.000	1200.000
A2-5	15512.458	15209.090	-303.368	6983.665	6680.104	-303.561	23.000	22.40186	-0.59814	4000.000	2700.000
5-6	1661.991	1000.000	-661.991	901.991	900.000	-1.991	22.43186	22.38247	-0.04939	1000.000	500.000
5-7	16207.508	10719.000	-5488.508	3078.113	2935.809	-142.294	22.43186	22.16039	-0.27147	5000.000	3000.000
7-8	600.671	600.000	-0.671	-493.329	-500.000	-6.671	22.16039	22.15735	-0.00304	600.000	100.000
7-9	4510.326	4500.000	-10.326	1655.198	1630.000	-25.198	22.16039	22.03882	-0.12157	4500.000	2000.000
A3-10	5140.868	5111.715	-29.153	-56.881	-84.732	-28.750	23.000	22.87174	-0.12826	1000.000	800.000
10-11	1001.585	1000.000	-1.585	-1007.348	-1100.000	-92.652	22.87174	22.86148	-0.01026	1000.000	700.000
A1-11	2581.248	2581.248	0.000	1000.000	1000.000	0.000	22.86148	22.86148	0.00000	1000.000	700.000

Pérdidas Totales (kW) 534,811

Ventana de resultados del flujo de carga.

3

### Optimización de la reconfiguración

Esta etapa está conformada por tres procedimientos de cálculos fundamentales y se ejecutan en el siguiente orden:

1. Para cada enlace a cerrar se buscan los posibles seccionalizadores a abrirse que garanticen que la carga transferida para cada caso pertenezca al alimentador más cargado, de esta forma se discriminan algunas parejas de enlace-seccionalizador que no cumplen con la condición anterior, y a las que sí cumplen se les llama opciones interruptivas y son las variantes con la cuales se continúa el proceso de optimización.

2. Para cada opción interruptiva se calcula la expresión (1) y se escogen las opciones interruptivas que ofrezcan reducción de pérdidas.

3. Con la variante que más reducción de pérdidas ofrece entre las encontradas en el paso 2, se verifican las restricciones impuestas respecto a los niveles de voltajes para cada nodo y la capacidad máxima de carga por los conductores en la nueva configuración obtenida. Si no hay violación de dichas restricciones se acepta esta configuración como solución final, de lo contrario, si es violada alguna restricción entonces es desechada esta variante y se analiza la segunda opción interruptiva con mayor reducción de pérdidas y se verifican encontrar la configuración que concuerde con las restricciones impuestas. las restricciones para el nuevo caso, si tampoco cumple con las restricciones se pasa a analizar la tercera variante que más reduce pérdidas y así sucesivamente hasta encontrar la configuración que concuerde con las restricciones impuestas.

Para el caso que se analiza, los resultados de la optimización son los de la figura 4.

2

El resultado final refleja que la máxima reducción de pérdidas se alcanza con el cierre del enlace 6-11 y la apertura del seccionalizador 5-6 y su valor es de 31,92 kW.

Variable	Enlace a cerrar	Secc. a abrir	Variación de Pérdidas (kW)
	6-11	5-6	-31,920

Ventana que muestra los resultados de la optimización.

4

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos se pueden validar mediante los valores numéricos contenidos en la tabla 2.

En la tabla 2 se expone, en la primera columna, las pérdidas totales del circuito en su configuración inicial. En la segunda columna aparece el valor de la reducción de las pérdidas pronosticado, que se puede alcanzar en el circuito si se adopta la topología óptima calculada por el algoritmo. En la tercera columna se muestra el valor de las pérdidas totales del circuito con la nueva topología. La cuarta columna refleja la variación de pérdidas totales calculadas en el circuito para los dos estados estudiados, el inicial y con la configuración propuesta por el algoritmo. La última columna expresa la diferencia en por ciento entre la reducción pronosticada y la real y su contenido demuestra que los resultados del algoritmo están muy cercanos a la realidad.

interfaz amigable y otros aspectos citados anteriormente.

3. El programa, que aún se encuentra en fase de desarrollo, puede ser una herramienta muy útil para el estudio de la reconfiguración de las redes de distribución, tanto en el ámbito docente como en el productivo.

## REFERENCIAS

1. Aoki, K.; T. Ichimori and M. Kanezashi: "Normal State Optimal Load Allocation in Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, No. 1, pp. 147-155, 1987.
2. Aoki, K.; H. Kawabara; T. Satoh and M. Kanezashi: "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeder", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 1865-1872, 1988.
3. Chirmohammadi, D. and H. W. Hong: "Reconfiguration of Electric Distribution for Resistive Line Loss Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1492-1498, April, 1989.
4. Civanlar, S.; J. J. Grainger; Y. Yin and S. S. Lee: "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 1217-1223, July, 1988.
5. Matos, M. A. and P. Melo: "Multiobjective Reconfiguration for loss Reduction and Service Restoration Using Simulated Annealing", *Proceedings of IEEE Power Tech 99 Conference*, Budapest, 1999.

## AUTORES

Yoel R. Rosales Hernández, Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail:yoelraul@electrica.cujae.edu.cu

Michel Zamora Arocha, Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Instructor, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:mzamora03@electrica.cujae.edu.cu

Pérdidas del circuito cond. Iniciales	Variación de pérdidas pronosticadas	Pérdidas del circuito reconfigurado	Variación de pérdidas reales	Diferencia entre variación real y pronosticada (%)
534,811kW	-31,92kW	504,805 kW	-30,006 kW	0,064

## CONCLUSIONES

1. En este trabajo se presentó un programa en desarrollo que permite calcular la configuración óptima de un circuito de distribución primaria para lograr las mínimas pérdidas.
2. Mediante la exposición del ejemplo numérico se demuestra las ventajas que presenta este en cuanto a: flexibilidad, facilidad para la entrada de datos,