

Reconfiguración automática de alimentadores en sistemas de distribución de energía eléctrica

Datos del Nodo Fuente

Número de Nodos del Alimentador	
Tensión del Alimentador [K.V]	
Código del Nodo	
Potencia Activa [KW]	
Potencia Reactiva [KVAR]	
Potencia Reactiva de los Capacitores [KVAR]	
X Cancelar ✓ Aceptar	

RESUMEN

En el trabajo se presenta la operación sistemática y automática de un algoritmo para reducir pérdidas en los sistemas de distribución, por reconfiguración de alimentadores.

ABSTRACT

To present the systematic and automatic operation of an algorithm to reduce losses at the distribution systems by reconfiguration of feeders.

1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo sistemático de una aplicación, para reducir pérdidas en los sistemas de distribución, se realiza: el estudio de los procedimientos utilizados para efectuar la conformación de redes de distribución, correr flujos de carga y efectuar análisis de reconfiguración, con el objetivo de racionalizar un método, crear una herramienta sobre un software amigable y, finalmente, obtener un procedimiento válido y confiable que permita analizar y tomar las decisiones necesarias para cada caso.

2. AUTOMATIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La distribución de energía eléctrica involucra actividades multidisciplinarias integradas que incluyen ingeniería, gestión, comercialización y administración.

☐ **Rafael Andrés Granobles T.**
Ingeniero Electricista
Asistente de Investigación y Docencia
Universidad del Valle

☐ **Juan Manuel Gers O, Ph.D.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad del Valle

☐ **Gladys Caicedo D, M.Sc.**
Ingeniera Electricista
Profesora Titular
Universidad del Valle

☐ **Carlos R. Pinedo, M.Sc.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad del Valle

* La Revista recibió este artículo en enero de 2.000

La automatización de la distribución implica la integración de sistemas digitales que utilizan elementos comunes pero que conservan su independencia y particularidad. Estos sistemas de automatización de la distribución conforman, con otros sistemas digitales, como por ejemplo: el sistema de control supervisado y de adquisición de datos (SCADA), el sistema de gestión de distribución DMS (distribution management System). En la figura 1, tomada de la referencia [7], se representa la integración de un sistema típico DMS. La reconfiguración automatizada de las redes de distribución, constituye el primer paso y la base, para lograr un sistema automatizado para toma de decisiones con todos los beneficios que éste trae. Para desarrollar la reconfiguración del sistema de distribución se debe realizar un flujo de carga radial, con el fin de determinar las condiciones iniciales del sistema.

3. FLUJOS DE CARGA

Los estudios de flujos de carga son de gran importancia para la planeación y el diseño de la expansión de los sistemas de potencia, así como en la determinación de las mejores condiciones de operación de ellos.

La información que se obtiene de un flujo de carga es:

- Magnitud y ángulo de fase del voltaje en cada barra.
- Potencia activa y reactiva que fluyen en cada línea.

Los datos que se deben suministrar para realizar un flujo de carga son:

- Voltaje del nodo fuente.
- Potencia activa y reactiva asociada a cada nodo.
- Resistencia y reactancia de las ramas que conforman el sistema.

El flujo de carga radial presenta las siguientes características y ventajas:

- Los cálculos son simples.
- Simplificación en la formulación matemática.
- Se trabaja únicamente con magnitudes de voltaje.
- La convergencia es rápida y hay facilidad para su sistematización.
- Se permite trabajar con cargas dependientes del voltaje para considerar cualquier tipo de carga.
- Se acepta alta relación de resistencia/reactancia y capacitancias despreciables.

En el flujo de carga radial que se utilizó en este trabajo se analiza, rama por rama, hasta que todas las ramas

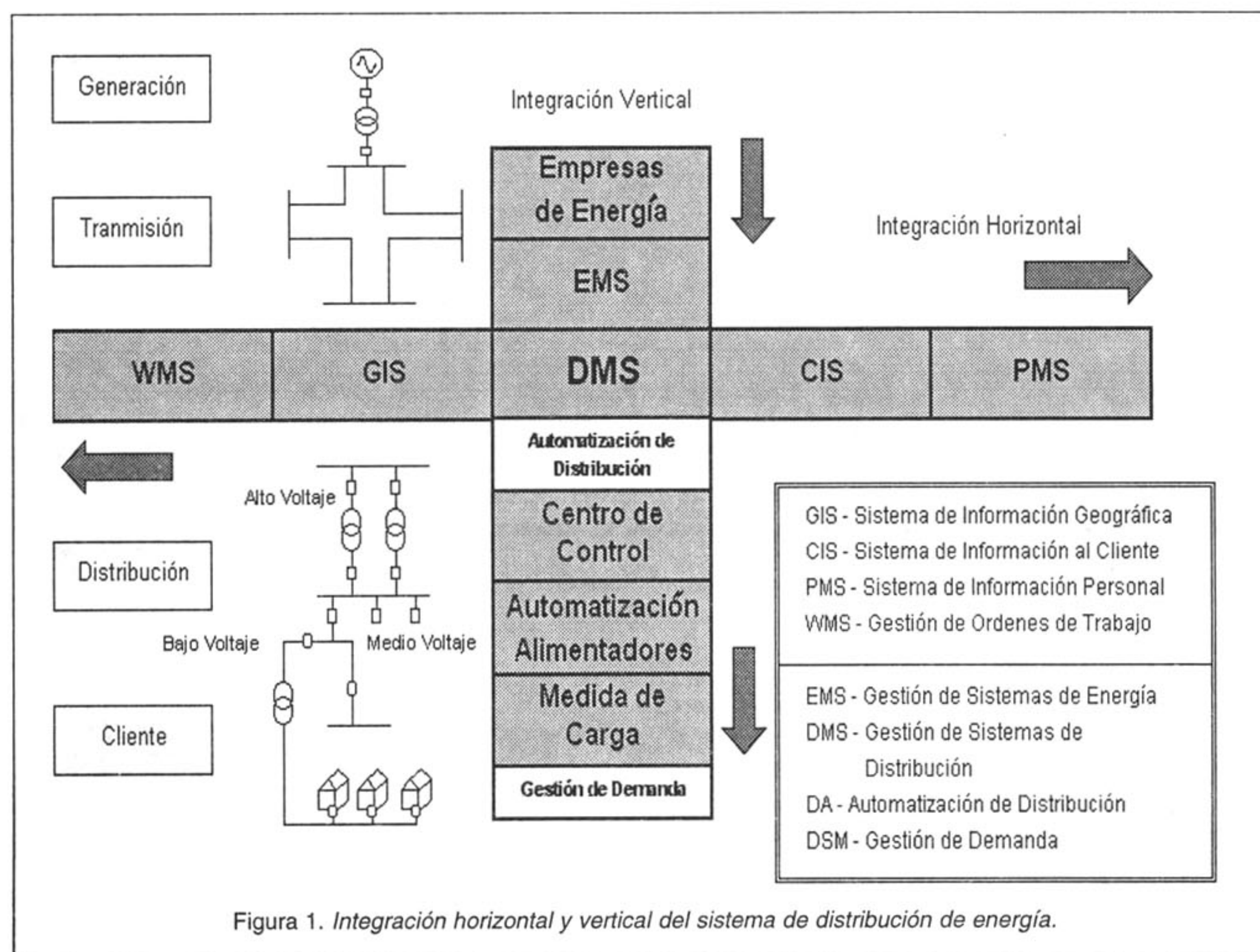


Figura 1. Integración horizontal y vertical del sistema de distribución de energía.

del sistema sean estudiadas utilizando la ecuación 1, tomada de la referencia [1]; el único requisito es conocer la impedancia ($R+jX$) de cada una y el vector de potencia S en los nodos de carga del sistema.

$$V_r^2 = \frac{V_s^2 - 2(PR + XQ) + \sqrt{V_s^4 + 4V_s^2(PR + XQ) - 4(XP - RQ)^2}}{2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

La ecuación 1 resuelve para cada nodo el valor de V_r , a partir del valor de V_s conocido previamente [1]. El método se usa sólo para sistemas de distribución, y se basa en la utilización de las magnitudes de los voltajes, eliminando las operaciones con números complejos, lo que proporciona una alta eficiencia y simplicidad en los algoritmos.

4. RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES

La metodología desarrollada para realizar el análisis de reconfiguración de los sistemas de distribución, se basa en la reducción de pérdidas y optimización del sistema, con base en el criterio de transferir carga de un alimentador a otro.

La reconfiguración de alimentadores se utiliza como una herramienta para el planeamiento y el control en tiempo real de sistemas de distribución. Las condiciones del sistema se pueden mejorar significativamente, realizando modificaciones en la estructura radial de los alimentadores, cambiando el estado (abierto/cerrado) de interruptores y transfiriendo carga de un alimentador a otro.

El modelo desarrollado para la reconfiguración de alimentadores, se basa en la referencia [2], y plantea la transferencia de carga de un alimentador con mayor caída de voltaje, en el punto de enlace, hacia otro con menor caída de voltaje en el enlace, buscando minimizar las pérdidas producidas en el sistema. Esto permite lograr los siguientes beneficios:

- Reducir la dimensión del análisis, al establecer un criterio heurístico para eliminar las opciones de suicheo que no cumplen la relación entre los voltajes, lo cual disminuye el número de casos de estudio.
- Reducir el trabajo computacional en la estimación de pérdidas.

Utilizando la ecuación 2 y el criterio de transferencia de carga, se estima la variación de pérdidas en el sistema.

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left\{ 2 \cdot \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{\text{lazo}} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la ecuación 2, para ΔP positivo, se obtiene una reducción de las pérdidas y para ΔP negativo se obtiene un incremento en las pérdidas, porque estas aumentan en el alimentador que recibe la carga cuando se realiza la reconfiguración.

El método propuesto permite considerar alimentadores de una misma subestación o de diferentes subestaciones, sin restricciones de ningún tipo. Se corre un flujo de carga para todos los alimentadores, en el estado o condición que se desee efectuar el análisis. El algoritmo se inicia a partir de los datos correspondientes a los enlaces normalmente abiertos (NA), cuya existencia se conoce entre los distintos alimentadores del sistema de distribución bajo estudio.

Como la reconfiguración se realiza entre dos alimentadores por vez, se analizan las posibilidades de reconfiguración asociadas a cada enlace NA.

El análisis para cada uno de estos enlaces se efectúa por separado, hasta obtener la reconfiguración óptima asociada a cada enlace NA. En la parte final se efectúa un análisis de estos resultados obtenidos y se determina la configuración óptima. Posteriormente, se repite este cálculo de manera iterativa, partiendo de la nueva base de datos que constituyen los alimentadores reconfigurados para así obtener la configuración óptima de todo el sistema, a partir del caso base y de los enlaces NA que se consideraron.

5. MODELADO DE LA INTERFASE GRÁFICA PARA EL PROGRAMA DE FLUJO DE CARGA Y RECONFIGURACIÓN DE REDES

A continuación se presenta un enfoque del software de flujo de carga radial y reconfiguración de sistemas de distribución a través del mejoramiento de la interfase con el usuario. El trabajo se realizó en varias etapas que incluyen la búsqueda de fuentes de información, diagrama de ambiente, formulación del problema y las especificaciones, buscando con esto lograr la concepción de la interfase con el usuario y la presentación de los datos [4].

Se partió de un software de análisis de reconfiguración de redes de distribución cuyo código original está escrito en lenguaje FORTRAN 77, versión Power Station bajo Windows, el cual representa el sistema original y requiere de la ejecución de dos programas llamados FLUJO.FOR y RECONF.FOR. Por medio de estos programas se ejecutan los procesos de lectura, procesamiento de datos y la representación de la solución. Estas actividades son necesarias dentro de la implementación de la solución, respecto al tipo de problema para el flujo de carga y reconfiguración de alimentadores.

La interfase gráfica proporciona al usuario un ambiente amigable por intermedio de cuadros o ventanas de diálogo, que facilitan el manejo de los datos dentro de la aplicación [4].

La concepción del problema se llevó a cabo con las siguientes etapas:

- Diseñar una interfase gráfica amigable al usuario.
- Leer las opciones del usuario y los datos necesarios para ejecutar tareas, desde la interfase.
- Implementar funciones que permiten escribir directamente en los archivos, como son: datos de alimentadores y enlaces.
- Escribir las subrutinas de cálculos de FLUJO.FOR y RECONF.FOR en el mismo código de la interfase, y de manera tal que, cuando estas sean invocadas por el algoritmo de la interfase sean escritas en el procedimiento respectivo.

6. IMPLEMENTACIÓN

La propuesta de interfase se basa en un sistema de ventanas que brinda Windows sobre facilidad en el manejo de la interfase.

Para facilitar la relación entre el sistema y la interfase se pasó el lenguaje de programación inicial del sistema (FORTRAN), al mismo lenguaje de la interfase (TURBO PASCAL), lo que brinda una mejor comunicación en el bus de datos que sirve como puente interno entre el usuario y el sistema.

La interfase con el usuario cuenta con:

- Una barra de opciones (menú) donde se encuentran opciones como: crear, abrir, salvar, guardar, imprimir un archivo de alimentadores, correr flujo de carga de un alimentador y reconfigurar.
- Una barra de herramientas para facilitar las opciones al usuario.

El usuario se comunica con el sistema a través de cuadros de diálogo y botones de aceptar, deshacer, atrás; esto crea un ambiente amigable de interfase. En cuanto a la representación de las estructuras internas del sistema por los condicionamientos impuestos por el sistema original, que imposibilita el uso de otras estructuras, se respetan los tipos y formatos de los archivos, dado que el sistema original utiliza una representación interna de manejo de archivos. La implementación propuesta se rige a éste tipo de comunicación a través de archivos, para lo cual la interfase crea los archivos de datos y de enlace de manera idéntica a como se creaban en el sistema original.

7. DESARROLLO DEL SISTEMA Y SU PRESENTACIÓN GRÁFICA

La interfase gráfica del programa de reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica se desarrolló en Delphi 3, lo que permitió construir la interfase de manera visual, utilizando el ratón (mouse), en lugar de comandos.

Como se puede observar en la figura 2, la interfase

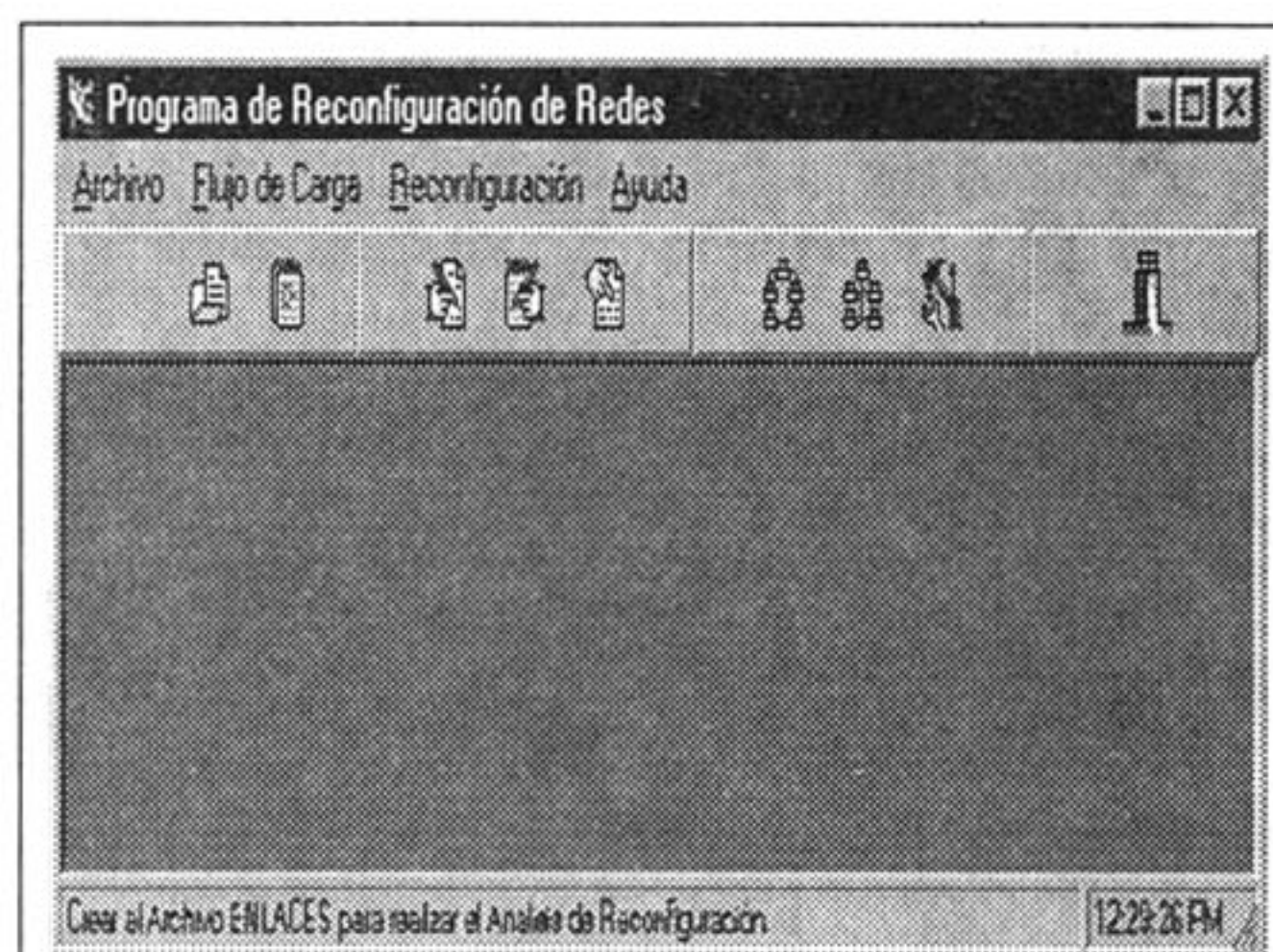


Figura 2. Interfase gráfica, para reconfiguración de alimentadores.

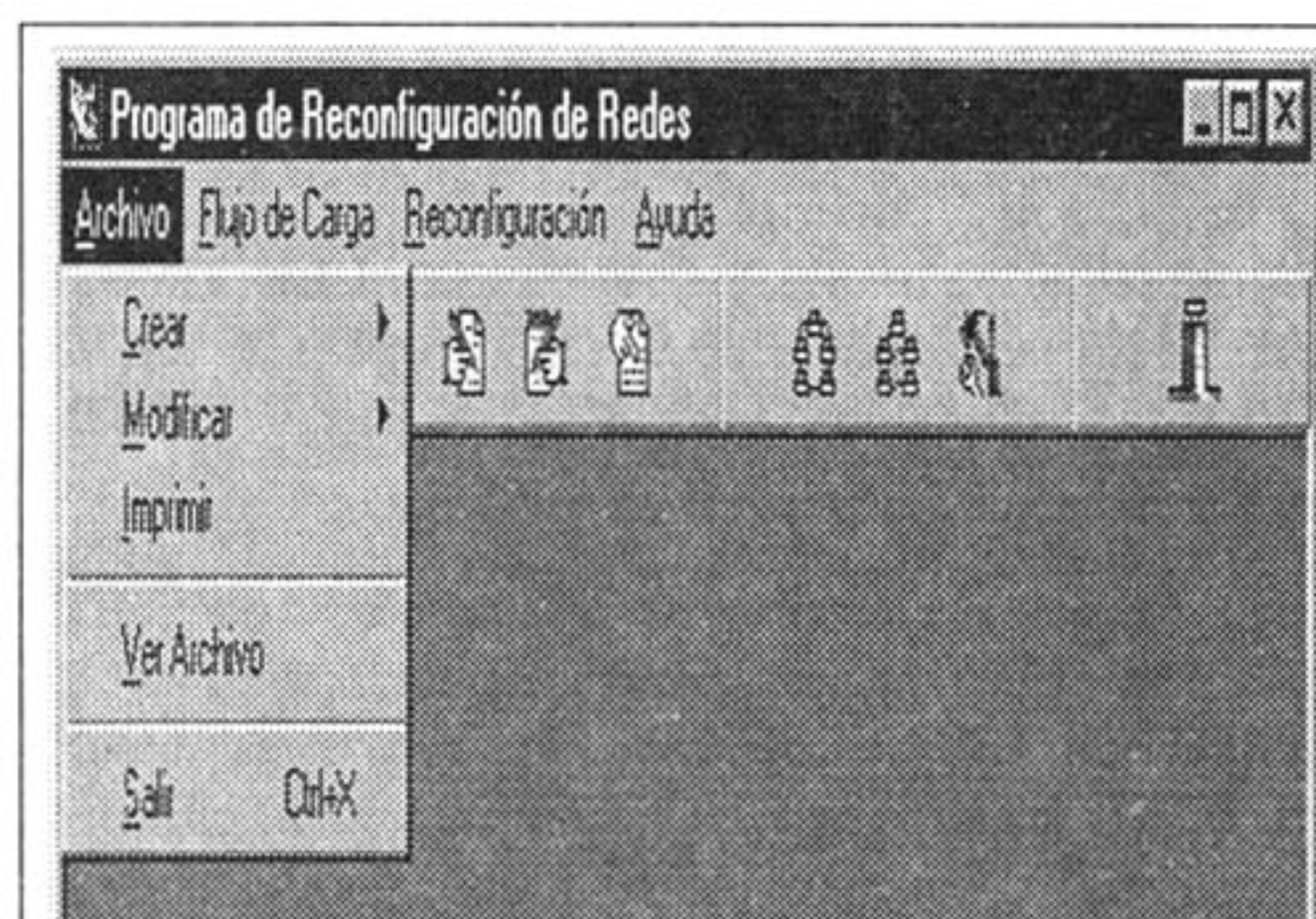


Figura 3. Menú archivo

posee un menú principal, una barra de botones rápidos y una barra de estado que provee ayudas de operación.

En la figura 3 se muestra el submenú archivo que permite crear, modificar imprimir, ver un archivo de alimentadores o de enlaces.

Se cuenta también con una opción de *ayuda*, que muestra la información general del programa de manejo y creadores, y una barra de botones rápidos que le permite al usuario realizar las operaciones más importantes del programa. Ver figura 3.

Así mismo, puede correr un flujo de carga para un alimentador nuevo o para alimentadores ya reconfigurados. Ver la figura 4.

Además la interfase permite al usuario realizar el análisis de reconfiguración minimizando pérdidas por la opción que se muestra en la figura 5.

La interfase no permite que el usuario omita la secuencia en las etapas para realizar el análisis de reconfiguración, puesto que se ha dotado de mensajes de error, que le avisan al usuario los errores cometidos.

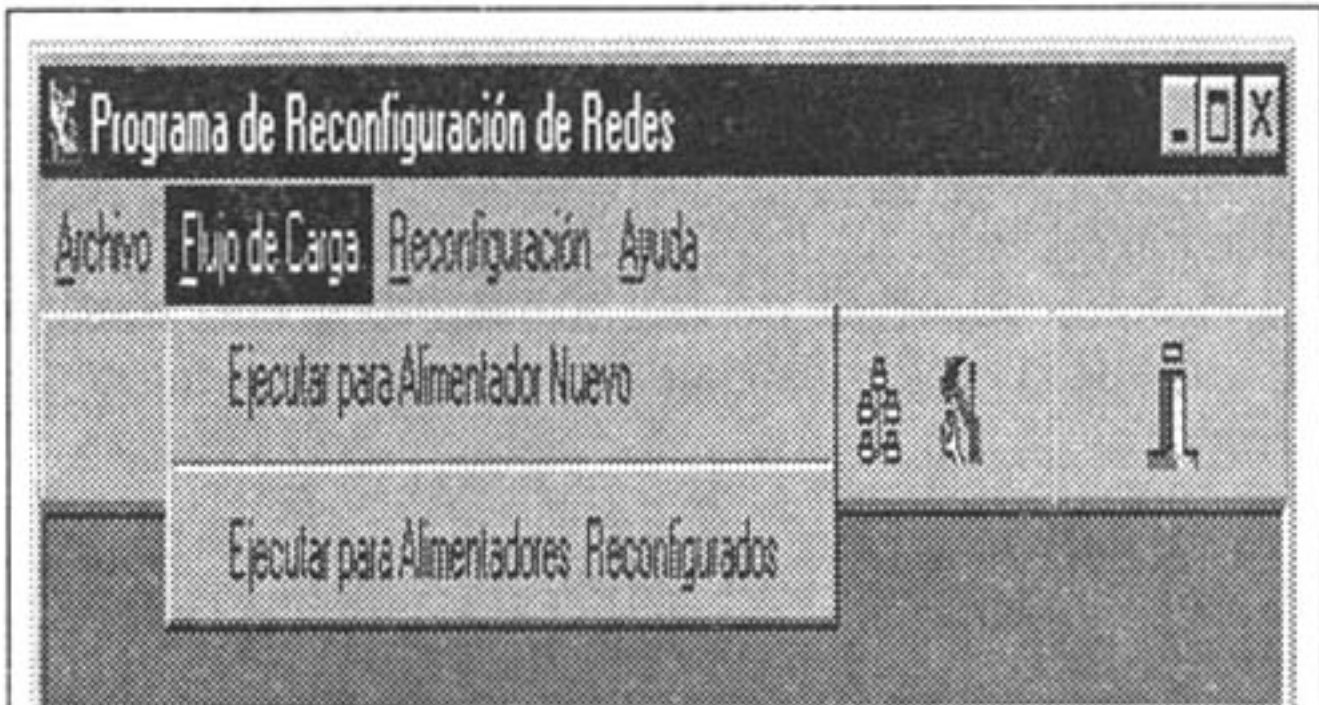


Figura 4. Menú flujo de carga.

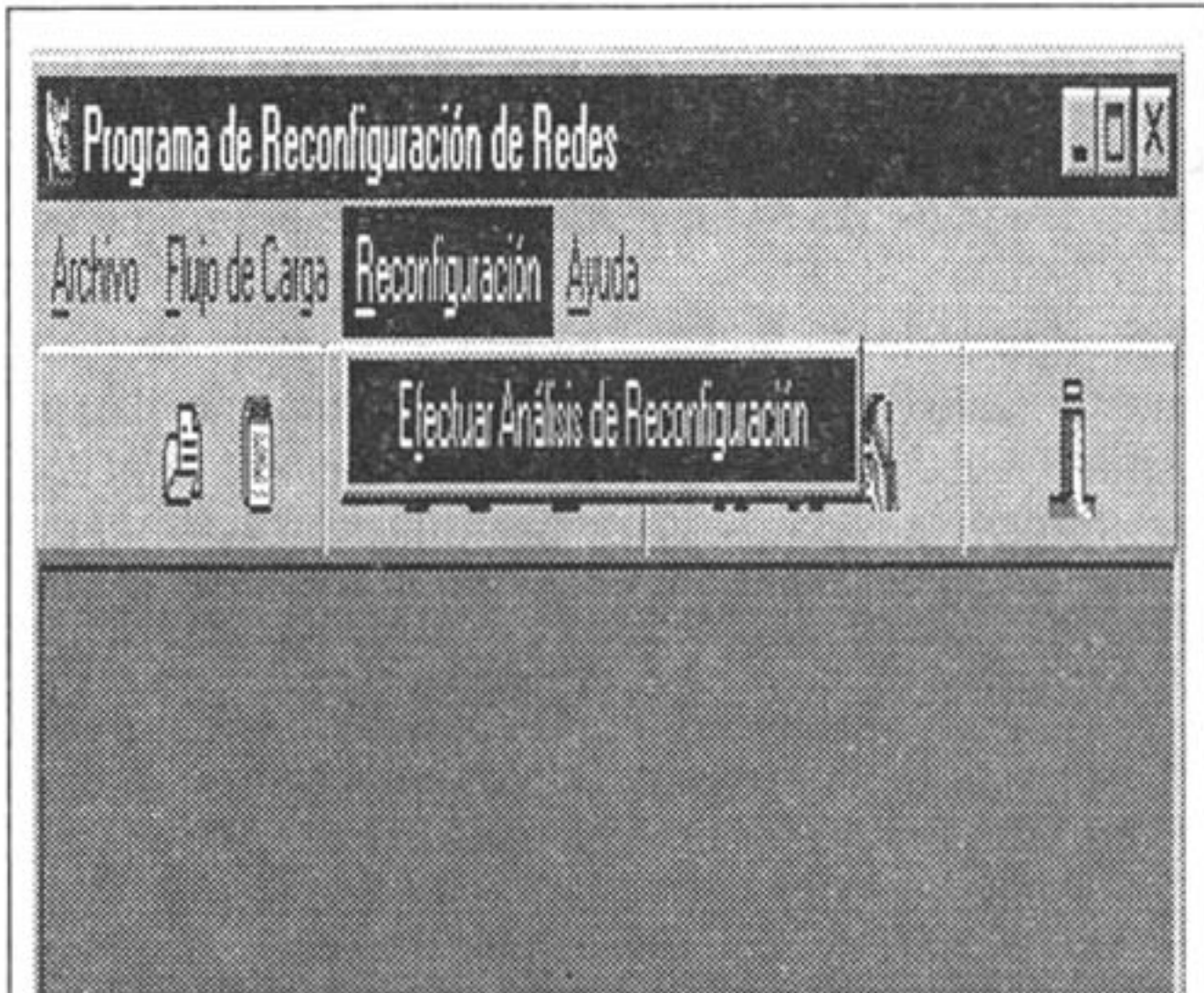


Figura 5. Menú reconfiguración

Datos del Nodo Fuente

Número de Nodos del Alimentador:

Tensión del Alimentador [K.V]:

Código del Nodo:

Potencia Activa [KW]:

Potencia Reactiva [KVAR]:

Potencia Reactiva de los Capacitores [KVAR]:

Figura 6. Ingreso de datos de nodos

Para crear un archivo de alimentadores desde la interfase, se debe seleccionar del submenú **archivo** la opción crear, la cual despliega la ventana "datos del nodo fuente". Ver figura 6. Primero se ingresan los datos del nodo fuente y luego por intermedio de una ventana similar se ingresan los datos de los nodos restantes del alimentador.

Seguidamente aparece la ventana para ingresar los datos de las ramas, ver figura 7. Pulsando la tecla "Aceptar" se almacenan los datos en un archivo tipo texto. El usuario debe dar el nombre a este archivo. La figura 8 muestra la ventana con los datos del alimentador, que se visualiza después de que el usuario ingresa el nombre del archivo.

Datos del Ramal Fuente

Código del **Nodo Fuente**:

Código del **Nodo del otro Extremo del Ramal**:

Resistencia del Ramal:

Reactancia del Ramal:

Figura 7. Ingreso de datos de ramas

C:\Tempora\Tesis Rafael\civanlal

Imprimir

Numero de Nodos: 5
Alimentador Código: civanlal
Tension del Nodo Fuente en [K.V]: 13.20000

* Datos de Entrada ordenados *

Datos de los Nodos

Codigo de Nodo	V[KV]	P[KW]	Q[KVAR]	C[QVAR]
9999	13.2000	0.00	0.00	0.00
4000	13.2000	2000.00	1600.00	0.00
4010	13.2000	2000.00	800.00	1200.00
4001	13.2000	3000.00	1500.00	1100.00
4020	13.2000	1500.00	1200.00	0.00

Datos de los Ramales

Ramal	Nodo Env	Nodo Rec	R[OHMS]	X[OHMS]
1	9999	4000	0.1307	0.1742
2	4000	4010	0.1568	0.1568
3	4000	4001	0.1394	0.1394
4	4010	4020	0.0697	0.0697

Figura 8. Datos del alimentador

Para el archivo creado, se corre el flujo de carga seleccionado del menú principal en el submenú flujo de carga, efectuar para un alimentador nuevo; la interfase muestra una ventana con los resultados, ver figura 9. Cuando se crea el archivo enlaces, de igual forma como se crea un archivo de alimentadores, se puede efectuar el análisis de reconfiguración, seleccionando esta opción del menú principal. La interfase también

muestra una ventana con los resultados del análisis. Ver figura 10.

Como se puede observar la interfase trabaja en forma eficiente e integral, donde los datos de entrada y salida se pueden observar desde la misma, y con posibilidades de corregir los datos y cometer el mínimo de errores.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una aplicación suficiente y necesaria para abordar la automatización de cualquier sistema de distribución.

El desarrollo de la aplicación entrega una metodología clara, concisa y precisa de automatización, que se puede utilizar en cualquier sistema para el control y supervisión de las redes distribución de energía eléctrica.

A diferencia de las aplicaciones que se encuentran en este tema, la interfase desarrollada, es más flexible en el manejo de los datos, porque permite:

- Ingresar los datos y revisar que no se cometan errores. De cometer un error se presenta la opción de modificar.
- Visualizar los archivos con los datos de entrada y salida inmediatamente después de haber sido creado.
- Imprimir los archivos que genera la interfase.
- Visualizar los archivos en el momento que el usuario lo requiera.
- Un manejo adecuado y ordenado de ventanas y botones que facilitan el trabajo con este tipo de aplicaciones.

Es una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones, para minimizar pérdidas y acumular criterios fundamentales en la configuración de redes de distribución, ante condiciones dadas de evaluación.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1.] CÉSPEDES R. G. «New method for analysis of distribution networks». IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 3, No. 3, pp 391 - 396, 1990.

[2.] CIVANLAR S, GRAINGER J. J, YIN H, LEE S. S. H. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 3, No. 3, pp 1217 - 1223, 1988.

[3.] ABREU B. E, CABRERA D. J. Reconfiguración Automatizada de Redes de Distribución Orientada a Mejorar la Calidad de su Servicio. Cali : Universidad del Valle, 1996

[4.] GRANOBLES R. A, MINOTTA J. M. "Metodología para la reconfiguración automática de redes de distribución de energía eléctrica". Cali. Universidad del Valle, 1998.

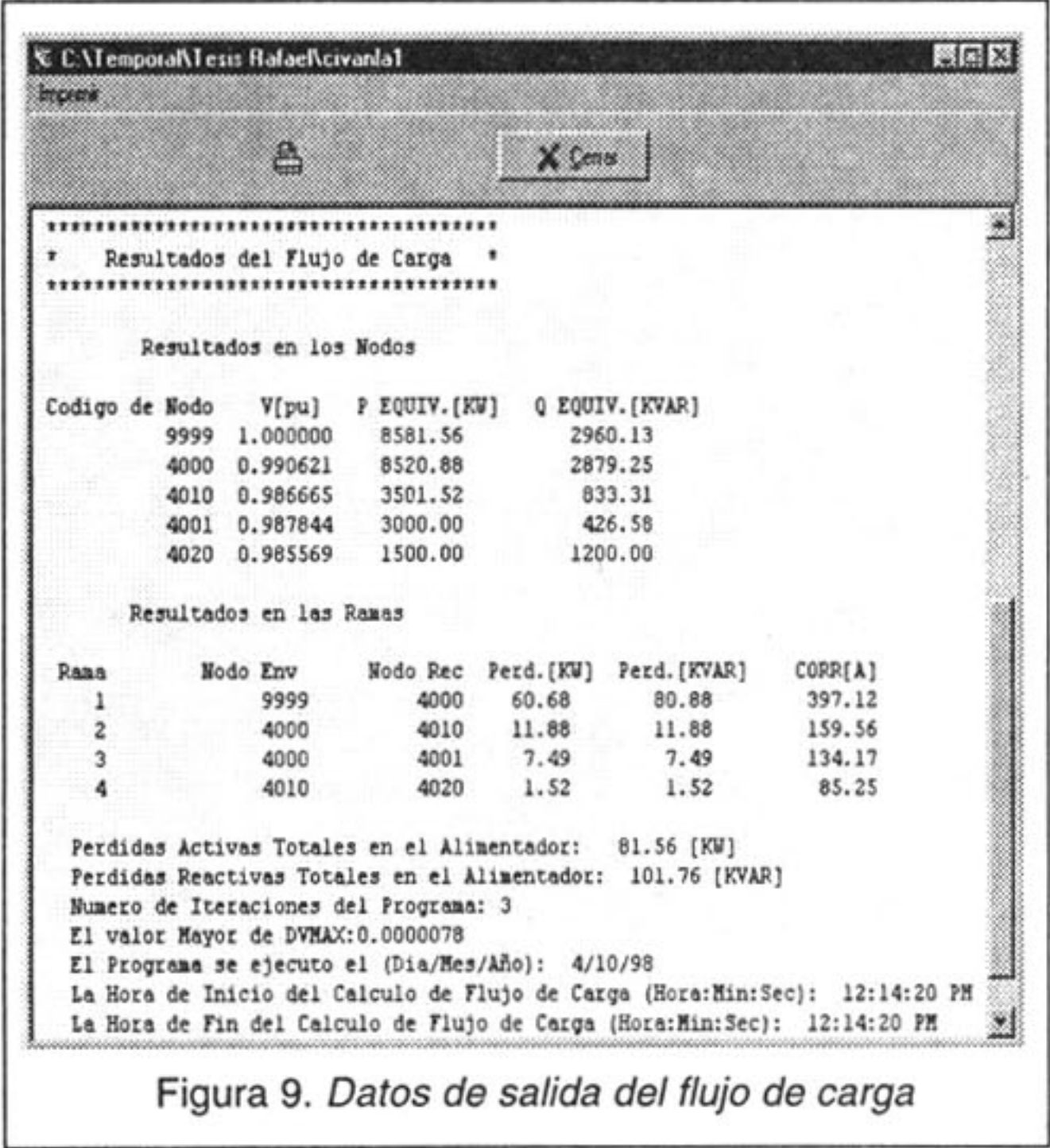


Figura 9. Datos de salida del flujo de carga

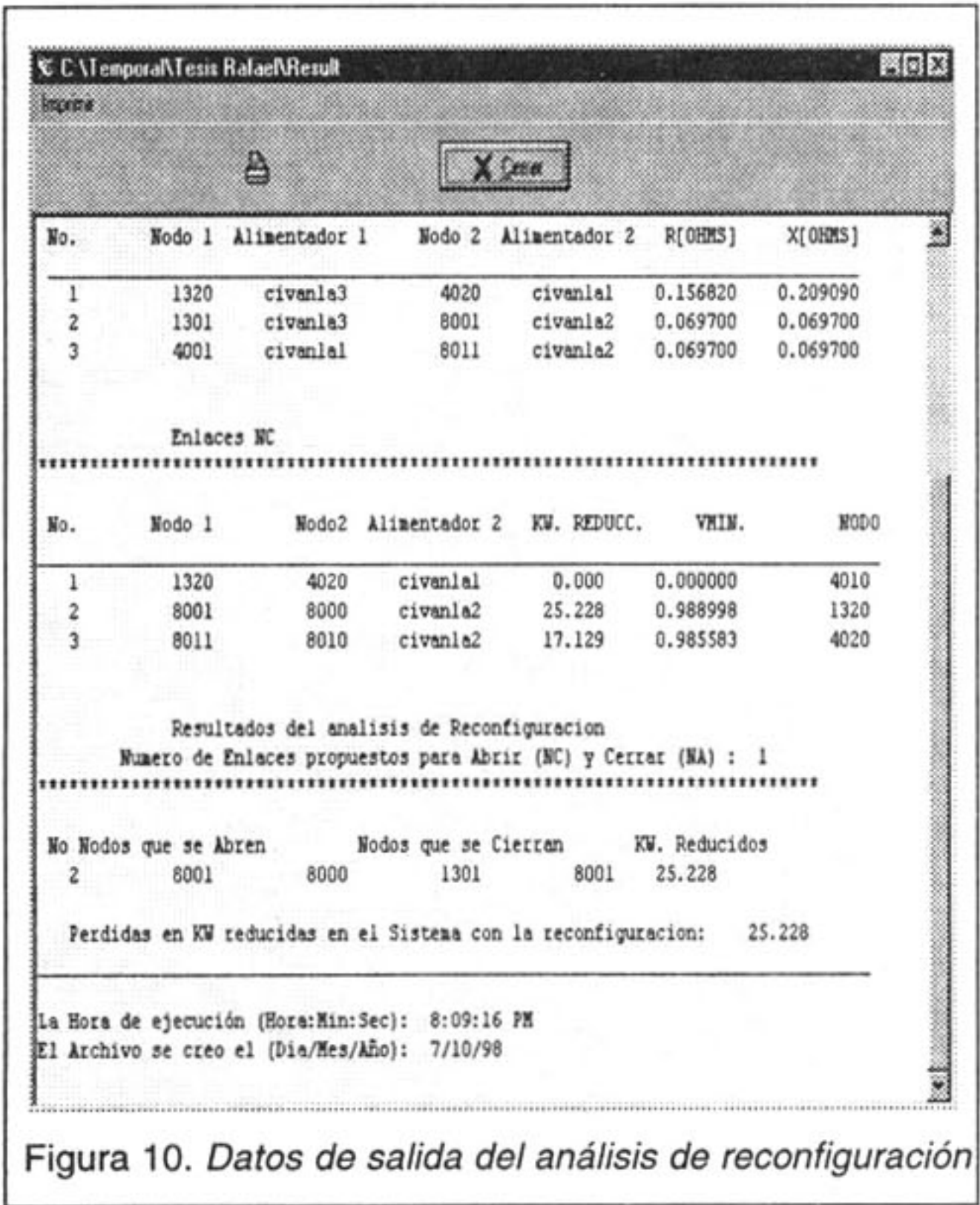


Figura 10. Datos de salida del análisis de reconfiguración

- [5.] K. L. Lo, GERS J. M. "Feeder reconfiguration for losses reduction in distribution systems". 29 TH Universities power engineering conference 1994. University College de Galway, Irlanda septiembre 14-16 de 1994.
- [6.] GERS J. M. "Reconfiguración de Sistemas de Distribución". II Seminario sobre análisis y automatización de sistemas de distribución, Cali. Abril 24-28 de 1995.
- [7.] NORTHCOTE J.D, ENGEL B. "Modular distribution management system concepts satisfy the varying needs of control room upgrades". ABB Network Control Division

AUTORES

Rafael Andrés Granobles. Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, 1998. Asistente de Investigación y Docencia y Estudiante del Programa de Maestría en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle. Actualmente continua su investigación en Sistemas de Potencia en el área de Reconfiguración de Redes y Automatización de los Sistemas de Distribución.



Gladys Caicedo Delgado. Ingeniera Electricista y Magíster en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle. Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Integrante de la Cátedra de Automática. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle.

Juan Manuel Gers Ospina. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle. Trabajó en el Departamento de Proyectos Eléctricos de CVC (hoy adscrito a EPSA) hasta 1979, como ingeniero de diseño de subestaciones eléctricas. Obtuvo su título de Magíster en la Universidad de Stanford del Reino Unido, en 1981. Se desempeña como profesor de la Universidad del Valle y como ingeniero consultor en GERS Ltda, empresa de la cual es socio fundador. Es autor de varias publicaciones entre ellas de un libro sobre aplicación de protecciones eléctricas en sistemas de distribución. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Strathclyde, Reino Unido en 1999.



Carlos Rafael Pinedo Jaramillo. Ingeniero Electricista y Magíster en Automática de la Universidad del Valle. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Integrante de la Cátedra de Percepción y Sistemas Inteligentes.

Un hombre sin un sueño y un plan es un hombre sin futuro.

Kenneth Walker
