UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILIS TOGA

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Balanceo de circuitos primarios mediante Algoritmo Genético Simple

Autor: Raúl Ginori Moreno

Tutor: Dr. Ignacio Pérez Abril

Santa Clara

2012

"Año del 54 aniversario del triunfo de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electoenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Balanceo de circuitos primarios mediante Algoritmo Genético Simple

Autor: Raúl Ginori Moreno

E-mail: rginori@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Ignacio Pérez Abril
Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos
Facultad de Ingeniería Eléctrica

E-mail: iperez@uclv.edu.cu

Santa Clara
2012
"Año del 54 Aniversario del Triunfo de la Revolución"

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

_____

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

_____ _____

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

_____

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

No basta con alcanzar la sabiduría, es necesario saber utilizarla.

Marco Tulio Cicerón

DEDICATORIA

- ***A mis Padres*** por educarme y guiarme siempre por el camino correcto, intentando hacer cada día mí, un hombre mejor

AGRADECIMIENTOS

- ***A mis padres*** por apoyarme en todo y estar a mi lado siempre que los necesite
- ***A mi familia*** por su apoyo incondicional
- ***A mi tutor*** por su entrega, dedicación y ayuda constante para la elaboración de este trabajo
- ***A los compañeros de aula*** por compartir la estancia en la UCLV
- ***A Damián*** por la atención prestada en cada momento que necesite su ayuda para la obtención de datos para la confección del trabajo
- ***A todos*** los que de una forma u otra me apoyaron

TAREA TÉCNICA

Para alcanzar el objetivo de este trabajo resulta imprescindible realizar las siguientes tareas técnicas:

1. Analizar el desbalance en los sistemas eléctricos de distribución primaria.

2. Reflejar los efectos negativos del desbalance.

3. Simplificar el planteamiento del problema de optimización.

4. Probar el método de optimización en un circuito con el objetivo de minimizar las pérdidas energía, el desbalance y la corriente por el neutro.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Aún cuando la operación más eficiente de un circuito trifásico se obtiene cuando la magnitud de sus corrientes de fases están igualmente equilibrada, desde el punto de vista operativo, es prácticamente imposible mantener dicho balance las 24 horas del día y en todos los nodos del circuito de distribución. La existencia de desbalance entre las corrientes de fase provoca un incremento de la corriente por el neutro, las pérdidas de potencia y energía en toda la longitud del circuito primario, al mismo tiempo que empobrece la calidad de la energía servida contribuyendo al desbalance de los voltajes en los distintos nodos del circuito. El presente trabajo utiliza un Algoritmo Genético Simple SGA implementado para seleccionar óptimamente las fases del circuito primario a que se deben conectar tanto los distintos transformadores y bancos de transformadores de distribución, como los ramales bifásicos y monofásicos del circuito, de forma que disminuya la corriente por el neutro y se minimicen las pérdidas de energía en toda la longitud del mismo.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

TAREA TÉCNICA iv

RESUMEN v

TABLA DE CONTENIDOS vi

INTRODUCCIÓN 1

Organización del informe 2

Capítulo 1: Desbalance en circuitos de distribución primaria 3

1.1 Características de los circuitos de distribución primaria en Cuba 4

1.2 Medición del desbalance en los sistemas eléctricos 5

1.3 Implicaciones del desbalance. 9

1.4 Efecto del desbalance en líneas, transformadores y otros. 9

Capítulo 2. Programa para el balanceo óptimo de circuitos de distribución primaria 11

2.1 Introducción al Algoritmo Genético Simple (SGA) 11

2.2 Formulación del problema 13

2.2.1 Ramales Bifásicos 13

2.2.2 Ramales Monofásicos 13

2.2.3 Bancos de Tres Transformadores 14

2.2.4 Bancos de Dos Transformadores: 17

2.2.5 Transformadores monofásico 18

2.2.6 Variables Independientes 20

2.2.7 Función Objetivo 20

2.2.8 Restricciones 21

2.3 Metodología para el uso del programa 22

Capítulo 3. Aplicación y resultados del algoritmo de balanceo 30

3.1 Análisis del Circuito #1 30

3.2 Análisis del Circuito #2 35

3.3 Análisis del Circuito #3 38

3.3 Análisis del Circuito #7 42

CONCLUSIONES 46

RECOMENDACIONES 47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

ANEXOS 50

Anexo I Monolineal del circuito #1 50

Anexo II Monolineal del circuito #2 51

Anexo III Monolineal del circuito #3 52

Anexo VI Monolineal del circuito #7 52

INTRODUCCIÓN

Aun cuando la operación más eficiente de un circuito trifásico se obtiene cuando la carga está totalmente balanceada entre las fases, desde el punto de vista operativo, es prácticamente imposible mantener dicho balance las 24 horas del día y en todos los nodos del circuito de distribución.

Sin embargo, el uso de transformadores monofásicos, si bien tiene ciertas ventajas desde el punto de vista de la explotación de las redes en cuanto a inversiones y flexibilidad al poder conformar bancos de diferentes características, también tiene cierta desventaja ya que contribuye de forma importante a acentuar el fenómeno del desbalance de carga entre las fases del circuito.

Por otra parte, la práctica de explotación de estos circuitos y el continuo incremento de la carga, provocan la adición de nuevos bancos de transformadores o la modificación de los ya existentes, lo que corrientemente se hace sin atender a consideraciones de balance en el circuito.

De hecho, se considera que los circuitos de distribución son los que exhiben mayor desbalance entre todos los tipos de circuitos del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).Esto se he comprobado en 4 circuitos de la ciudad de Santa Clara.

La existencia de desbalance entre las corrientes de fase provoca un incremento de la corriente por el neutro y de las pérdidas de potencia y energía en toda la longitud del circuito primario, al mismo tiempo que empobrece la calidad de la energía servida al contribuir al desbalance de los voltajes en los distintos nodos del circuito primario.

Diferentes técnicas de programación se han aplicado en la reconfiguración de redes eléctricas de distribución para minimizar las pérdidas de energía y mejorar el balance de la carga, como un caso especial de reconfiguración, se ha empleado un algoritmo genético para la selección óptima del arreglo de fases a las que se debe conectar tanto los distintos transformadores y bancos de transformadores de distribución, como los ramales bifásicos y monofásicos, de forma que se minimicen las pérdidas de energía, la corriente por el neutro y se logre un mejor balance de las fases en toda la longitud del circuito en un alimentador radial.

De esta manera, el **objetivo general** del presente trabajo es determinar el número de reconexiones mínima necesarias para el balance de carga óptimo de los circuitos de distribución primaria #1, #2, #3 y #7 de la ciudad de Santa Clara

Objetivos específicos

1. Realizar una búsqueda bibliográfica

2. Desarrollar un algoritmo para obtener el balance óptimo de circuitos de distribución primaria realizando el número mínimo de reconexiones.

3. Implementar en el Matlab el algoritmo realizado

4. Aplicar el método y valorar los resultados obtenidos

El programa que se presenta en este trabajo para lograr los objetivos trazados constituye una herramienta para la solución de circuitos distribución primaria desbalanceados mostrando el ahorro de energía en líneas y la corriente por el neutro.

Organización del informe

El trabajo está estructurado en 3 capítulos. El primero presenta las características de los circuitos de distribución primaria en Cuba, el efecto del desbalance en ellos y la definición de desbalance. El segundo capítulo hace un acercamiento a al Algoritmo Genético Simple y la metodología para el uso del programa. El tercer capítulo presenta la aplicación del método y los resultados en los cuatros circuitos analizados en el trabajo

Capítulo 1: Desbalance en circuitos de distribución primaria

La aplicación del balance de carga en los sistemas de distribución primaria tiene un impacto positivo en la calidad del servicio de los usuarios contribuyendo a un nivel de tensión adecuado y brindar a los usuarios la prestación de un mejor servicio maximizando confiabilidad y seguridad. Por lo anterior es importante desarrollar una metodología que encuentre buenas soluciones económicamente viables y técnicamente eficientes

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

El aumento del consumo de energía eléctrica, debido a la creación de nuevas áreas residenciales, comerciales o industriales cuya demanda debe ser atendida fortalece el problema del desbalance en las redes de distribución primaria. El estudio de estas expansiones es de vital importancia para la empresa distribuidora de energía eléctrica dado que es en esta parte de sistema donde se encuentra gran cantidad de pérdidas.

Un buen balanceo de carga en un sistema de distribución debe comenzar con el estudio de las características de los consumidores, por lo general los análisis de pérdidas en una red de distribución se realizan tomando la demanda máxima de los usuarios y se asume esta para todo el período de estudio realizando así una aproximación de las pérdidas totales del sistema en un tiempo determinado. Esta metodología es poco conveniente debido a que las cargas conectadas son de distinta naturaleza, es muy diferente la característica de consumo que presentan cada uno de los tipos de usuarios (residencial, industrial, etc.), por lo tanto el resultado obtenido dista un poco de la realidad

1.1 Características de los circuitos de distribución primaria en Cuba

Los circuitos de distribución primaria en Cuba están conformados por elementos de potencia que transportan la energía eléctrica recibida en los puntos de entrega de los sistemas de distribución. Están constituidos por las subestaciones de distribución de las cuales parten los circuitos de distribución. Los sistema de distribución como su nombre lo dice son los encargado de distribuir la energía eléctrica en una zona geográfica dada. Por lo general, los circuitos primarios tienen topología radial a cuatro hilos (tres conductores para las fases y un conductor neutro), operan a media tensión y constan de un tramo principal con muchas ramificaciones que puede contener ramales de solo dos fases y neutro (bifásicas) o de una sola fase y neutro (monofásicas)

En el país la distribución primaria se realiza 13.8kV (preferido) o 4.16kV en los circuitos más antiguos, mediante circuitos radiales que parten de la subestación de distribución con una configuración trifásica que en su curso pueden variar y convertirse en bifásica o monofásica.

A pesar de que los sistemas eléctricos trifásicos se diseñan sobre bases balanceadas, existen asimetrías intrínsecas en la configuración de las componentes del sistema de potencia, tales como transposición incompleta de líneas, transformadores conectados en delta abierta o estrella incompleta, cargas monofásicas mal distribuidas, impedancias asimétricas en las redes de alimentación. Además se presentan fallas monofásicas, desperfectos en empalmes, uniones o contactos y asimetrías de las propias fuentes de suministro.

En nuestro país el sector eléctrico ha sufrido restricciones de recursos financieros que no han permitido el adecuado desarrollo en la ampliación y el mantenimiento a la red de distribución eléctrica. Esto ha provocado altas pérdidas de energía principalmente por causas técnicas en la red de distribución primaria. Esto ha provocado altas pérdidas de energía, principalmente por causas técnicas en la red de distribución primaria.

En términos generales las pérdidas de distribución se producen por desbalances y sobrecargas en los circuitos, dado el incremento del consumo y las características

técnicas de la red. Por estas razones, una de las condiciones más generalizadas en los sistemas de suministro eléctrico lo constituye, en mayor o menor grado, el desbalance de tensión

La distribución secundaria emplea en lo fundamental un sistema delta con voltajes 240/120V para cargas monofásicas y 240 V para cargas trifásicas, que se obtiene a partir de bancos trifásicos de tres o dos transformadores monofásicos, o de transformadores monofásicos

Aún cuando la operación más eficiente de un circuito trifásico se obtiene cuando la carga está totalmente balanceada entre las fases, desde el punto de vista operativo, es prácticamente imposible mantener dicho balance las 24 horas del día y en todos los nodos del circuito de distribución. Sin embargo, el uso de transformadores monofásicos, si bien tiene ciertas ventajas desde el punto de vista de la explotación de las redes en cuanto a inversiones y flexibilidad al poder conformar bancos de diferentes características, contribuye de forma importante a acentuar el fenómeno del desbalance de carga entre las fases del circuito. Por otra parte, la práctica de explotación de estos circuitos y el continuo incremento de la carga, provocan la adición de nuevos bancos de transformadores o la modificación de los ya existentes, lo que corrientemente, se hace sin atender a consideraciones de balance en el circuito. De hecho, se considera que estos circuitos son los que exhiben mayor desbalance entre todos los tipos de circuitos del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

La existencia de desbalance entre las corrientes de fase, provoca un incremento de las pérdidas de potencia y energía en toda la longitud del circuito primario, al mismo tiempo que empobrece la calidad de la energía servida, al contribuir al desbalance de los voltajes en los distintos nodos del circuito primario.

1.2 Medición del desbalance en los sistemas eléctricos

Se han propuesto diferentes formas de cuantificar el desbalance, que responden a definiciones desarrolladas por distintas instituciones, y mucho se ha publicado

sobre la mejor manera de expresarlo sin que se llegue a un consenso. Las definiciones fundamentales existentes son:

- Factor de desbalance de tensión de línea definido por la NEMA (National Electric Manufacturing Association):

$$\mathrm{FDLV} = \frac{\mathrm{Máx}\{|\mathrm{V_{ab}} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_{bc}} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_{ca}} - \mathrm{V_{avg}}|\}}{\mathrm{V_{avg}}} * 100\%$$

Donde:

$\mathrm{Máx}\{|\mathrm{V_{ab}} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_{bc}} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_{ca}} - \mathrm{V_{avg}}|\}$, es el valor máximo de la diferencia entre las tensiones de línea (V) y el valor promedio de las tensiones de línea definido como:

$$\mathrm{V_{avg}} = \frac{\mathrm{V_{ab}} + \mathrm{V_{bc}} + \mathrm{V_{ca}}}{3} \qquad (\mathrm{V})$$

- Factor de desbalance de tensión de fase según la IEEE Std. 141:

$$\mathrm{FDVF} = \frac{\mathrm{Máx}\{|\mathrm{V_a} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_b} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_c} - \mathrm{V_{avg}}|\}}{\mathrm{V_{avg}}} * 100\%$$

Donde:

$\mathrm{Máx}\{|\mathrm{V_a} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_b} - \mathrm{V_{avg}}|, |\mathrm{V_c} - \mathrm{V_{avg}}|\}$, es el valor máximo de la diferencia entre las tensiones de fase (V) y el valor promedio de las tensiones de fase definido como:

$$\mathrm{V_{avg}} = \frac{\mathrm{V_a} + \mathrm{V_b} + \mathrm{V_c}}{3} \qquad (\mathrm{V})$$

- Factor de desbalance de tensión (o grado de desequilibrio) definido por la IEC como la relación porcentual entre la componente de secuencia negativa de la tensión (o corriente) con la componente de secuencia positiva.

El factor de desbalance (FDV) o grado de desequilibrio de tensión (Gd) será:

$$\mathrm{FDV} = \mathrm{Gd} = \frac{\mathrm{V_2}}{\mathrm{V_1}} * 100\%$$

Donde:

$\mathrm{V_2}$- Tensión de secuencia negativa

$\mathrm{V_1}$- Tensión de secuencia positiva

De forma análoga el desbalance de las cargas puede medirse a partir del grado de desbalance de corriente:

$$\mathrm{Gd} = \frac{\mathrm{I_2}}{\mathrm{I_1}} * 100\%$$

Donde:

$\mathrm{I_2}$- Corriente de secuencia negativa

$\mathrm{I_1}$- Corriente de secuencia positiva

Estas expresiones permiten evaluar de manera certera el desbalance en los sistemas eléctricos industriales.

- Factor de desbalance de tensión complejo definido como el anterior, pero teniendo en cuenta no solo el valor modular de las componentes de tensión, sino también su ángulo de fase:

$$\overline{\mathrm{K_v}} = \frac{\overline{\mathrm{V_2}}}{\overline{\mathrm{V_1}}} * 100\% = \mathrm{K_{V*}} e^{\mathrm{j}\theta_\mathrm{v}}$$

Donde k_v es el módulo y θ_v el ángulo de fase en grados, del factor de desbalance complejo.

De estos factores, el más utilizado en la práctica es el propuesto por la NEMA, ya que aunque no especifica qué tipo de desbalance tiene lugar, evita el uso del álgebra compleja y el trabajo con componentes simétricas, empleando las mediciones del valor rms de las tensiones de línea directamente.

La ANSI (American Nacional Standards Institute) recomienda un factor de desbalance inferior al 3% bajo condiciones no sinusoidales (ANSI C84.1-1995). Por su parte, el Comité Electrotécnico Internacional (IEC) recomienda, en sistemas eléctricos, un factor de desbalance de tensión menor del 2%.

Otras formas de hallar una medida del desbalance son los siguientes:

- A partir de la potencia instalada: Consiste en determinar un coeficiente de asimetría (a) en función con la potencia activa distribuida en el sistema trifásico:

$$\mathrm{a} = \frac{\mathrm{P_{nud}}}{\mathrm{P_{ud}}} * 100\%$$

Donde:

Pnud - Potencia no uniformemente distribuida en la red trifásica, que se determina como la suma de la diferencia con respecto a la menor potencia activa de fase.

Pud - Potencia uniformemente distribuida en la red trifásica, que se determina como tres veces la menor potencia activa de fase.

Se considera que el sistema es simétrico sí $a \leq 15\%$.

Este método permite determinar el desbalance en cargas. Sin embargo está basado en la teoría de Budeano aplicada a los sistemas trifásicos. No reconoce la presencia de una potencia de asimetría. De allí su principal limitación. Por otra parte, no tiene en cuenta los desbalances de carga reactiva.

-A partir del porciento de desbalance (δU): Consiste en determinar el por ciento de desbalance de la máxima desviación de tensión media, en relación con el promedio de las tensiones de línea en un intervalo de 10 min

$$\delta U = \frac{U_{med(máx)}}{U_{med}} * 100\%$$

Donde:

Umed (máx) - Máxima desviación de tensión de línea con relación a la tensión promedio.

Umed - Promedio de las tensiones de línea.

La expresión anterior es solo una aproximación del por ciento de la componente de tensión de secuencia negativa). Para desbalances de tensión superiores al 5%, es necesario un estudio a partir del factor de desbalance.

1.3 Implicaciones del desbalance.

Es bien conocido que el desbalance de tensión tiene un efecto perjudicial sobre la mayoría de las aplicaciones eléctricas [12], motivando la dedicación de esfuerzos a la investigación de este efecto en diversas áreas. Un aspecto que ha interesado a numerosos estudiosos de este fenómeno es el relacionado con las pérdidas que provoca en las redes eléctricas y sus métodos de cálculo y simulación en diferentes regímenes, incluyendo transitorios.

El balance perfecto de las cargas en las tres fases de un sistema trifásico es imposible de lograr en condiciones reales, donde existen cargas trifásicas y monofásicas conectadas al circuito industrial. Por otra parte, los voltajes de suministro no son perfectamente simétricos, pues el sistema eléctrico nacional está afectado por la asimetría de las cargas y otros elementos que lo constituyen. [7]

1.4 Efecto del desbalance en líneas, transformadores y otros.

En las líneas y transformadores del sistema el desbalance ocasiona un incremento de las pérdidas de potencia activa, limitación de la capacidad de carga y sobreestimación de capacidades en el diseño. En los dispositivos y convertidores electrónicos de potencia el desbalance provoca armónicos triples que favorecen la

distorsión armónica, incrementos de corrientes de consumo, mal funcionamiento y disminución de su vida útil.

El desbalance de las corrientes de fases también influye negativamente en el funcionamiento de algunos esquemas de protecciones por relés, provocando operaciones erráticas y sacando de funcionamiento equipos.

Por otra parte, el desbalance del circuito incrementa sustancialmente la corriente por el conductor neutro en condiciones de operación normal, lo cual complica la detección de las fallas a tierra a partir de la magnitud de la corriente de neutro. Interruptores muy empleados como los NU-LEC consideran la presencia de una avería cuando la corriente de neutro supera el 15% de la de fase y por ello en muchas ocasiones se omite la utilización de esta función de protección.

El desbalance en las redes de distribución provoca pérdidas adicionales por calentamiento, disminución de su vida útil así como disminución en la eficiencia de los motores de inducción trifásicos, tan frecuentemente utilizados en la industria. Según se establece en la norma IEEE 1159 un desbalance de 3,5% en tensión puede resultar un 25% de aumento del calentamiento en algunos motores. [2]

Capítulo 2. Programa para el balanceo óptimo de circuitos de distribución primaria.

2.1 Introducción al Algoritmo Genético Simple (SGA)

Los Algoritmos Genéticos son un ejemplo de método que explota la búsqueda aleatoria “guiada” que ha ganado popularidad en los últimos años debido a la posibilidad de aplicarlos en una gran gama de campos y a las pocas exigencias que impone al problema. Surgen como herramientas para la solución de complejos problemas de búsqueda y optimización, producto del análisis de los sistemas adaptativos en la naturaleza, y como resultado de abstraer la esencia de su funcionamiento.

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos de búsqueda de propósito general basados en los principios de la genética natural, es decir, son algoritmos de búsqueda que simulan los procesos de la evolución darwiniana a través del uso de operadores genéticos que operan sobre una población de individuos que “evoluciona” de una generación a otra, basados en los mecanismos de la selección natural y la genética. Los Algoritmos Genéticos incluyen conceptos tales como cromosomas, genes, reproducción por cruzamiento, selección, mutación y evolución, los cuales toma prestados de la genética natural para construir un modelo útil y fácil de implementar computacionalmente, de manera que un problema específico actúa como medio ambiente dentro del cual se desempeña una población formada por individuos que son soluciones candidatas del problema en cuestión. Cada uno de estos individuos (fenotipo), está formado por la información contenida en su genoma (genotipo) y que bien pueden ser las variables independientes cuyo valor se desea conocer.

Similarmente a como se propone para la evolución natural, a pesar de la existencia de sofisticados métodos para el flujo de potencia en circuitos de distribución [3] [5] [10], los AG tienden a encontrar mejores soluciones al problema de manera progresiva, gracias a la “renovación del material genético” en la población por medio de los llamados operadores genéticos. La adaptación de los

individuos a su ambiente, se determina por la función de aptitud (función fitness), la cual constituye una medida de la calidad de la solución.

Los AG trabajan con una codificación del conjunto de parámetros, no con los parámetros en sí, y realizan la búsqueda a partir de una población de puntos, no de un punto simple. Los AG solo utilizan la información de la función objetivo, sin derivadas u otro conocimiento auxiliar y se garantiza la obtención de un conjunto amplio de buenas soluciones, y tienen la capacidad de resolver una variedad de problemas muy difíciles de forma rápida y confiable. La mayoría de los especialistas en este tema coinciden en que los AG pueden resolver las dificultades representadas en los problemas de la vida real que a veces son insolubles por otros métodos. [9] [11]

En general, el AG procede como sigue:

1. Generación aleatoria o heurística de una población inicial, P(0).

2. En cada ciclo evolutivo t (generación), se selecciona un subconjunto de individuos P'(t), después de ser evaluados bajo el criterio predefinido por la función de aptitud para reproducirse. Los individuos más aptos tienen más posibilidades de reproducirse, mientras los menos aptos tienden a desaparecer.

3. Se modifica la población seleccionada, para encontrar nuevos puntos en el espacio de búsqueda, aplicando operadores genéticos como el cruzamiento y la mutación.

4. Se introducen los nuevos individuos P» (t) en la población de la siguiente generación P (t+1) y se repite el proceso a partir de la selección de los más aptos.

5. El fin de la búsqueda queda condicionada a un número determinado de generaciones, a la obtención de un valor aceptable de la función de aptitud, etc.

Diferentes técnicas de programación evolutiva [13] [6] [14] [15], se han aplicado en la reconfiguración de redes eléctricas de distribución para minimizar las pérdidas de energía y mejorar el balance de la carga. Como un caso especial de reconfiguración, se ha empleado un algoritmo genético para la selección óptima

del arreglo de fases para la conexión de los transformadores de distribución en un alimentador radial [4].

2.2 Formulación del problema

Los circuitos de distribución primaria tienen una configuración radial ramificada, que puede contener NR ramales bifásicos y/o monofásicos, así como NT bancos de transformadores y/o transformadores monofásicos. La conexión de estos elementos al circuito primario, determina la forma en que se reflejan las corrientes de carga en las fases del circuito y por lo tanto tiene una implicación directa en el desbalance de carga.

2.2.1 Ramales Bifásicos

Un ramal bifásico siempre tiene que conectarse a la sección trifásica del circuito. Si se denota como XR la variable que representa la conexión de este ramal, las fases F1 y F2 a que se conecta para los posibles valores de XR son (tab. 2.1):

Tab.2.1: Variantes de Conexión de un Ramal Bifásico

Fase	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 3$
F_1	***A***	***B***	***C***
F_2	***B***	***C***	***A***

2.2.2 Ramales Monofásicos

Un ramal monofásico puede conectarse tanto de la sección trifásica como de un ramal bifásico. En el primer caso las variantes de conexión son tres (tab.2.2):

Tab.2.2: Variantes de Conexión de un Ramal Monofásico a Sección Trifásica

Fase	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 3$
F_1	***A***	***B***	***C***

Sin embargo, cuando el ramal se conecta a un ramal bifásico que lo precede, solo tiene dos variantes de conexión, pero de acuerdo a la propia conexión X_R^0 del ramal precedente, se generan las siguientes variantes (tab.2.3):

Tab.2.3: Variantes de Conexión de un Ramal Monofásico a Ramal Bifásico

Ramal	$X_R^0 = 1$		$X_R^0 = 2$		$X_R^0 = 3$	
Fase	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 1$	$X_R = 2$
F_1	***A***	***B***	***B***	***C***	***C***	***A***

2.2.3 Bancos de Tres Transformadores

Los bancos de tres transformadores tienen conexión Y-Δ. En esta conexión, el neutro de la estrella no se aterra para evitar que el banco sirva de paso a las corrientes de secuencia cero tanto de carga como en régimen de falla. Estos bancos se constituyen por un Transformador de Alumbrado (TA) al que se conecta la carga monofásica de 240/120 V y dos Transformadores de Fuerza (TF) iguales que completan el banco para suministrar carga trifásica a 240 V.

Para simplificar el análisis, se va a considerar que la carga monofásica de 120V está perfectamente distribuida entre las dos secciones del TA, de forma que puede considerarse una carga al V_{LL} de 240 V con corriente I_{1F}, mientras que la carga trifásica de 240 V tiene una corriente por fase I_{3F}.

$$I_{1F} = (P_{1F} - jQ_{1F})/V_{LL}$$

(1)

$$I_{3F} = (P_{3F} - jQ_{3F})/V_{LL}$$

Como puede inferirse de la Fig. 1, los voltajes de línea en el secundario están en fase a los voltajes de fase del primario. Por lo cual las corrientes de carga i1, i2, i3 estarán desfasadas adicionalmente los ángulos φ(F1), φ(F2), φ(F3) de los voltajes de fase en el prima

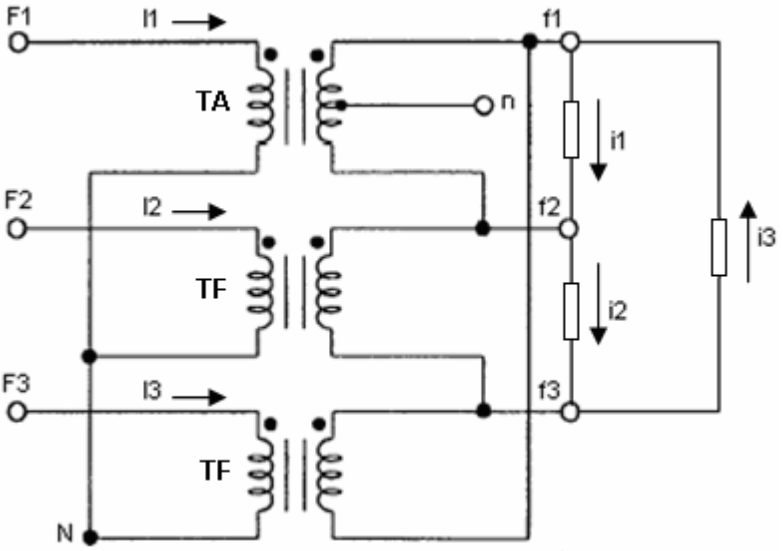


Fig. 1. Banco de tres transformadores con conexión Y-Δ

De esta forma:

$$i_1 = (I_{1F} + I_{3F})\exp(j\varphi(F_1))$$

$$i_1 = (\quad + I_{3F})\exp(j\varphi(F_2)) \qquad (2)$$

$$i_1 = (\quad + I_{3F})\exp(j\varphi(F_3))$$

Considerando que el neutro del primario no está aterrado y aplicando el principio de superposición, pueden determinarse las corrientes en el primario como:

$$I_1 = +\frac{2}{3}i_1 - \frac{1}{3}i_2 - \frac{1}{3}i_3$$

$$I_1 = -\frac{1}{3}i_1 + \frac{2}{3}i_2 - \frac{1}{3}i_3 \qquad (3)$$

$$I_1 = -\frac{1}{3}i_1 - \frac{1}{3}i_2 + \frac{2}{3}i_3$$

Este tipo de banco solamente puede conectarse a una sección trifásica del circuito y como los dos transformadores de fuerza son iguales, las variantes de conexión al circuito primario, representadas por la variable XB son tres (tab.2.4):

Tab.2.4: Variantes de Conexión de un Banco de Tres Transformadores

Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 3$
F_1	***A***	***B***	***C***
F_2	***B***	***C***	***A***
F_3	***C***	***A***	***B***

2.2.4 Bancos de Dos Transformadores:

Los bancos de dos transformadores (fig.2) tienen conexión Yg-Δ abierta y se emplean para dar servicio trifásico y monofásico combinados donde la carga trifásica es menor que la monofásica. Estos bancos pueden conectarse tanto en ramales trifásicos como bifásicos, ya que reciben alimentación de solo dos fases y neutro. Están constituidos por un TA al que se conecta la carga monofásica de 240/120 V y un TF que en conjunto pueden suministrar carga trifásica de 240V.

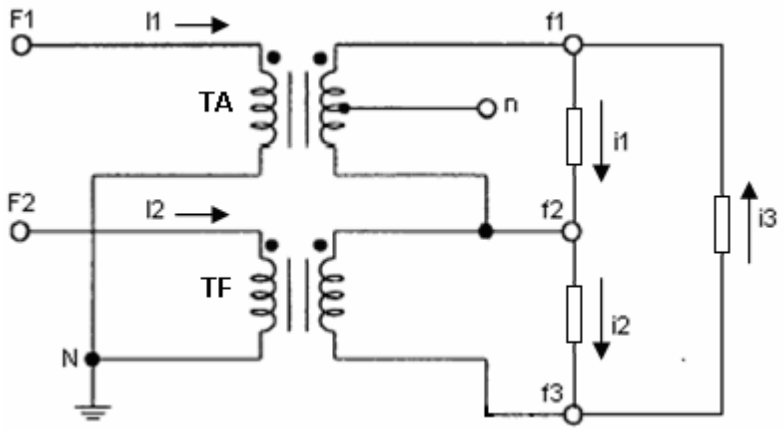


Fig. 2 Banco de dos transformadores con conexión Y-Δ abierta

Al igual que en el banco de tres transformadores, las corrientes de carga i_1,i_2 ,i_3 se calculan por (2) y aplicando superposición, se obtienen las corrientes en el primario como:

$$I_1 = i_1 - i_3$$

(4)

$$I_2 = i_2 - i_3$$

Cuando este banco se encuentra conectado en una sección trifásica del circuito, existen seis variantes posibles de conexión (tab.2.5):

Tab.2.5: Variantes de Conexión de un Banco de Dos transformadores en una Sección Trifásica

Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 3$	$X_B = 4$	$X_B = 5$	$X_B = 6$
F_1	A	B	B	C	C	A
F_2	B	A	C	B	A	C

En el caso que este banco se encuentre conectado a un ramal bifásico, las variantes de conexión se reducen a solo dos, pero como el ramal bifásico puede conectarse a la sección trifásica del circuito en tres posiciones diferentes de acuerdo al valor de la $X_R$del ramal, la tabla de conexiones quedaría (tab.2.6):

Tab.2.6: Variantes de Conexión de un Banco de Dos transformadores en un Ramal Bifásico

Ramal	$X_R = 1$		$X_R = 2$		$X_R = 3$	
Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$
F_1	***A***	***B***	***B***	***C***	***C***	***A***
F_2	***B***	***A***	***C***	***B***	***A***	***C***

2.2.5 Transformadores monofásico

Finalmente, los transformadores monofásicos (fig.3) se emplean para dar solo servicio monofásico a cargas de 240/120 V

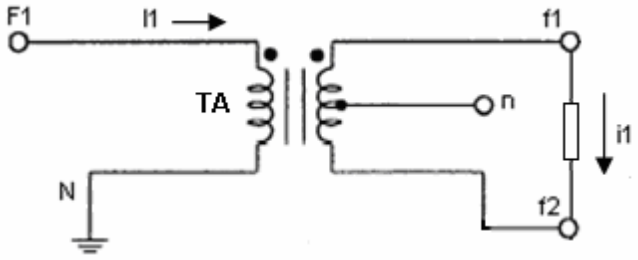


Fig. 3 Transformador monofásico.

En este caso, solo hay corriente en la fase F_1, por lo tanto:

$$\mathrm{I}_1 = \mathrm{i}_1 \qquad (5)$$

Estos transformadores pueden figurar en secciones trifásicas, bifásicas y monofásicas del circuito, por lo que las variantes de conexión dependen del número de fases de la sección.

Cuando el transformador se encuentra conectado en una sección trifásica del circuito, existen tres variantes posibles de conexión (tab.2.7):

Tab.2.7: Variantes de Conexión de un Transformador Monofásico en una Sección Trifásica

Fase	$\boldsymbol{X_B = 1}$	$\boldsymbol{X_B = 2}$	$\boldsymbol{X_B = 3}$
$\boldsymbol{F_1}$	A	B	C

Si el transformador se encuentra conectado a una sección bifásica del circuito, las variantes de conexión se reducen a solo dos, pero como el ramal bifásico puede conectarse a la sección trifásica del circuito en tres posiciones diferentes de acuerdo al valor de la X_R del ramal, la tabla de conexiones quedaría (tab.2.8):

Tab.2.8: Variantes de Conexión de un Transformador Monofásico en un Ramal Bifásico

Ramal	$\boldsymbol{X_R = 1}$		$\boldsymbol{X_R = 2}$		$\boldsymbol{X_R = 3}$	
Fase	$\boldsymbol{X_B = 1}$	$\boldsymbol{X_B = 2}$	$\boldsymbol{X_B = 1}$	$\boldsymbol{X_B = 2}$	$\boldsymbol{X_B = 1}$	$\boldsymbol{X_B = 2}$
$\boldsymbol{F_1}$	***A***	***B***	***B***	***C***	***C***	***A***

Cuando el transformador monofásico se conecta a un ramal monofásico, solo hay una posición posible, por lo que no se genera variable. No obstante, la fase a que

conecta el transformador varía de acuerdo a la fase a que se conecte dicho ramal. [1]

2.2.6 Variables Independientes

De acuerdo al análisis precedente, las variables del problema se representan por el vector x de NR+NT elementos, que contiene las variables de conexión X_R y X_B de todos los ramales, bancos de transformadores y transformadores monofásicos del circuito. Los valores de x van a ser números enteros que pertenecen al conjunto de las posibles variantes de conexión de los diferentes elementos.

2.2.7 Función Objetivo

Las pérdidas de potencia para el estado de carga t en un tramo k del circuito con resistencia $\mathrm{R\,k}$ de los NFk conductores de fase y Rnk del conductor neutro, dependen de:

$$\Delta \mathrm{P_k} = \mathrm{R_k} \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{NF_k}} |\mathrm{I_{i,k,t}}|^2 + \mathrm{Rn_k} \left| \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{NF_k}} \mathrm{I_{i,k,t}} \right|^2 \qquad (6)$$

Donde $\mathrm{Ii,k,t}$ representa la corriente que circula por la fase i, en el tramo k para el estado de carga t si cada estado de carga t, tiene una duración Tt, entonces las pérdidas de energía $\Delta \mathrm{E}$ en un día de operación normal del circuito dependen de la suma de las pérdidas en los N tramos y para el ciclo de trabajo de 24 horas:

$$\Delta \mathrm{E} = \sum_{\mathrm{t}} [\sum_{\mathrm{K=1}}^{\mathrm{N}} \Delta \mathrm{P_{k,t}}] \, \mathrm{T_t} \qquad (7)$$

Estas pérdidas de energía dependen de las conexiones empleadas para todos los transformadores y ramales del circuito, por lo que son una función de la minimización de las pérdidas de energía mediante el cambio de conexiones de los transformadores y ramales es un problema no lineal en enteros, lo que hace muy difícil su solución por métodos tradicionales. Además, los métodos enumerativos no pueden aplicarse por la gigantesca cantidad de variantes que surgen. Estos argumentos conducen a la idea de emplear un Algoritmo Genético (AG) para la solución de este problema.

Como los algoritmos genéticos producen la maximización de una función objetivo [6], esta debe expresarse como el ahorro de pérdidas de energía al sustituir las conexiones iniciales x0 por las conexiones óptimas x, es decir:

$$\mathrm{F(x)} = \Delta\mathrm{E(x0)} - \Delta\mathrm{E(x)}$$

Sin embargo, la consecución de este objetivo no garantiza por si solo que se logre una reducción suficiente de la corriente de neutro a la cabeza del circuito.

2.2.8 Restricciones

Para lograr este objetivo adicional, se incluye en el problema la restricción de quela relación K de la corriente máxima de neutro $\mathrm{I_N}$ con respecto a la corriente de fase promedio I_P en la cabeza del circuito sea inferior a un valor límite

$$\mathrm{G_{(X)}} = \begin{cases} [\mathrm{K_{(x)}} + \mathrm{K_{máx}}]^2 & \text{si } \mathrm{K_x} > \mathrm{K_{máx}} \\ 0 & \text{si } \mathrm{K_x} \leq \mathrm{K_{máx}} \end{cases} \quad (11)$$

Sin atender a la existencia de los sofisticados métodos que existen para el flujo de potencia en circuitos de distribución [3] [5] [10], con el propósito de reducir el tiempo de cálculo en la evaluación de la función objetivo Fobj(x), se ha programado un flujo de potencia trifásico simplificado, que determina las corrientes de los tramos de línea en cada hora del día, considerando voltaje nominal en todos los nodos de la red. La variación temporal de las cargas se ha representado mediante gráficos característicos para 24 horas, que se utilizan en todas las empresas de distribución eléctrica del país.

Al ejecutar el AG en su forma original, se observó que en general un número considerable de variables mantenían su valor inicial en la respuesta. Esto condujo a la idea de fijar el valor de estas variables al inicial y extraerlas de la optimización. El proceso se describe con el siguiente algoritmo, que termina una vez que se obtenga una solución en que todas las variables difieren de su valor inicial. Este procedimiento conduce a obtener soluciones de máximo ahorro con cada vez menor número de cambios de conexión con respecto al circuito original. Sin embargo, en el proceso de obtención de estas soluciones máximas, se desechan soluciones con distinto número de cambios de conexión que tienen ahorros

inferiores a las máximas obtenidas, pero que pueden a su vez ser máximas para un número de cambios de conexión diferentes al de la solución máxima determinada. Esto abre una oportunidad interesante.

Para no perder estas soluciones, se incluye un arreglo global de soluciones óptimas que almacena las soluciones que se van obteniendo por cada número de cambios de conexión a realizar. De esta forma, al concluir la optimización se dispone de las mejores soluciones de n, n-1, n-2,…, etc. cambios de conexión, lo que permite al Ingeniero escoger la variante a emplear.

2.3 Metodología para el uso del programa

Este algoritmo genético simple (SGA) es implementado en el MATLAB. El mismo emplea un archivo de datos en EXCEL que suministra los datos necesarios del circuito al programa.

La (fig.2.3.1) muestra un ejemplo del archivo empleado:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	N1	N2	Fases	CFase	CNeutro	Long	FVar	Tipo	TA	TF1	TF2	P	Q	K1	PF1	Grafico	TVar	Qc
2	No0	No1	ABC	A150	CN6	148	0	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0
3	No1	No2	ABC	CN2	CN6	55	0	YY	-	-	-	77	30	0	1	Residenc	1	0
4	No2	No3	ABC	CN2	CN6	65	0	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0
5	No3	No4	ABC	CN2	CN6	45	0	2T	C	B	-	26	10	0.7	0.9	Residenc	1	0
6	No4	No5	ABC	CN2	CN6	145	0	2T	B	C	-	84	33	0.7	0.9	Residenc	1	0
7	No5	No6	ABC	CN2	CN6	170	0	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0
8	No6	No7	ABC	CN2	CN6	85	0	1T	C	-	-	13	5	1	0.9	Residenc	1	0
9	No6	No8	ABC	CN2	CN6	30	0	1T	C	-	-	26	10	1	0.9	Residenc	1	0
10	No3	No9	ABC	CN2	CN6	75	0	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0
11	No9	No10	ABC	CN2	CN6	100	0	2T	B	C	-	13	5	0.7	0.9	Residenc	1	0
12	No10	No11	ABC	CN2	CN6	195	0	2T	C	A	-	38	15	0.7	0.9	Residenc	1	0
13	No9	No12	ABC	CN2	CN6	145	0	2T	C	A	-	19	8	0.7	0.9	Residenc	1	0
14	No12	No13	ABC	A150	CN6	60	0	YY	-	-	-	40	16	0	0.9	Residenc	1	0
15	No13	No14	ABC	A150	CN6	90	0	2T	A	C	-	38	15	0.7	0.9	Residenc	1	0
16	No14	No15	ABC	A150	CN6	105	0	1T	A	-	-	26	10	1	0.9	Residenc	1	0
17	No15	No16	ABC	CN0	CN6	50	0	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0
18	No16	No17	ABC	CN0	CN6	135	0	2T	C	A	-	19	8	0.7	0.9	Residenc	1	0
19	No17	No18	ABC	CN0	CN6	78	0	2T	B	C	-	13	5	0.7	0.9	Residenc	1	0
20	No16	No19	ABC	A150	CN6	50	0	2T	C	B	-	26	10	0.7	0.9	Residenc	1	0

Fig.2.3.1 Archivo de datos de EXCEL

Los datos fundamentales por cada rama del circuito son:

-N1 (nodo de inicio)

-N2 (nodo final)

-Fases que presenta dicho ramal (ABC, AB, BC, CA., A, B, C)

-Conductor de fase

-Conductor de neutro

-Longitud del ramal

-FVar (fases a variar) aquí da la posibilidad de variar las fases si pones un 1 y de no variarlas si se le pone 0

-Tipo de banco de transformador conectado

-Fases a la que está conectada cada transformador (Transformador de alumbrado, transformador de fuerza1, transformador de fuerza2)

-Potencia activa

-Potencia reactiva

- % de carga monofásica (K1)

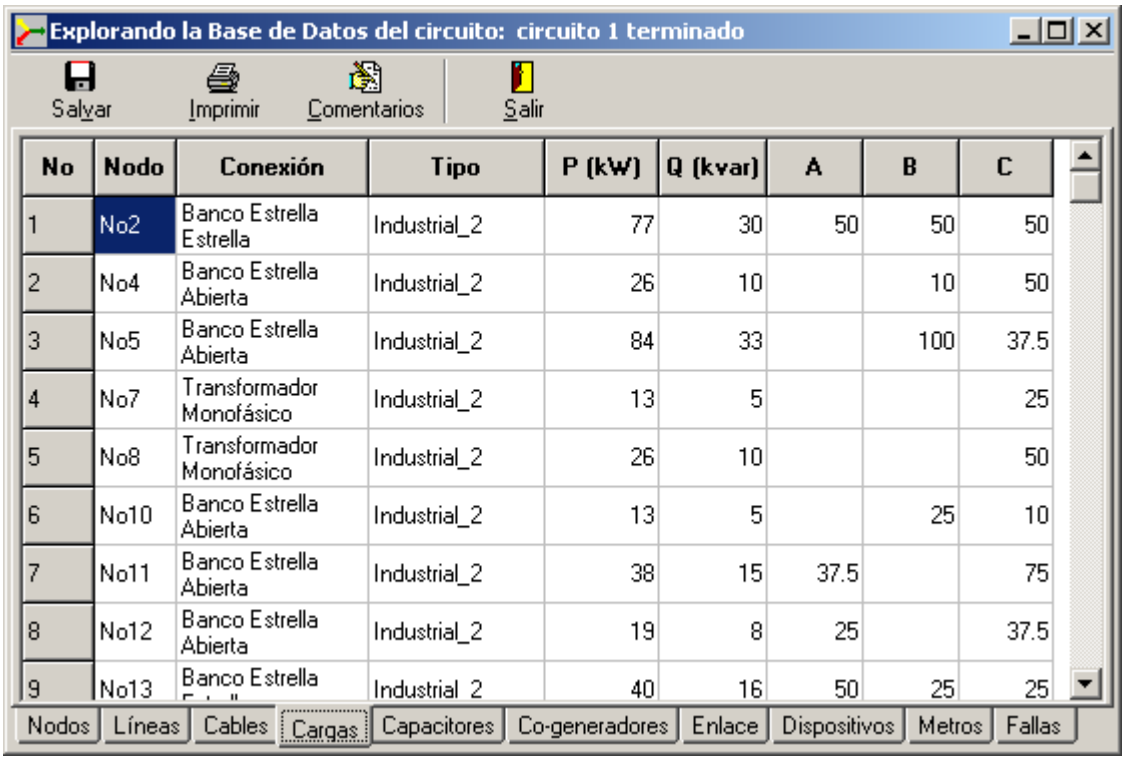
-tipo de gráfico de la carga conectada

- TVar Da la posibilidad de variar la conexión del banco de transformador poniendo un 1 y de mantenerlo con un 0

-capacidad del banco de capacitores si existiera

Para la obtención de buenos resultados en este se debe tener una actualización de los circuitos en que se van a trabajar en cuanto a los banco de transformadores, tipo de carga, tipo conductor en las fase y neutro en el RADIAL para cuando se haga una comparación con los datos del NULEC comprobar si son similares los valores de corrientes de fase y neutro y asegurarse que se está trabajando con el circuito adecuado. Luego de tener el circuito montado en el

RADIAL, para obtener dicho EXCEL con los datos necesario se necesita salvar un .txt de las: líneas, cargas y bancos de capacitores y este último si existieran como se muestra en la (fig.2.3.2):



No	Nodo	Conexión	Tipo	P (kW)	Q (kvar)	A	B	C
1	No2	Banco Estrella Estrella	Industrial_2	77	30	50	50	50
2	No4	Banco Estrella Abierta	Industrial_2	26	10		10	50
3	No5	Banco Estrella Abierta	Industrial_2	84	33		100	37.5
4	No7	Transformador Monofásico	Industrial_2	13	5			25
5	No8	Transformador Monofásico	Industrial_2	26	10			50
6	No10	Banco Estrella Abierta	Industrial_2	13	5		25	10
7	No11	Banco Estrella Abierta	Industrial_2	38	15	37.5		75
8	No12	Banco Estrella Abierta	Industrial_2	19	8	25		37.5
9	No13	Banco Estrella	Industrial_2	40	16	50	25	25

Fig. 2.3.2 Ventana del RADIAL para salvar datos de las cargas

Una vez que se dispone de los archivos .TXT con los datos del circuito, estos datos se agrupan en el EXCEL introduciendo el siguiente comando en el Matlab

Txt2xls('líneas.txt','cargas.txt','capacitores.txt','nombre del cto',voltaje del cto)

De no existir capacitores en el circuito en que se esté trabajando el comando a introducir será el siguiente

Txt2xls('líneas.txt','cargas.txt','cto #',voltaje del cto)

Este comando es un programa que facilita la creación del EXCEL a partir de los datos disponibles en el RADIAL, pero algunos datos no los imprime el RADIAL, por lo que hay que hacer una revisión del conductor del neutro, del % de carga monofásica, factor de potencia y de los bancos de transformadores si los que aparecen realmente son los de alumbrados y los de fuerzas, esto último es debido

a que dicho programa selecciona el transformador de alumbrado como el mayor pero en caso excepcional que no sea así estaría mal escogido, por eso es necesario hacer este paso tan importante, además en el caso de que sea un banco de dos o tres transformadores monofásico de igual capacidad quizás no escoja el correcto de aquí que surge este proceso de revisión.

Una vez que el archivo Excel esté con los datos correctos, se ejecuta el programa de optimización: Execbalance que se encarga de correr el algoritmo genético para optimizar el balanceo del circuito, la línea de comando es:

Execbalance(‘nombre de archivo EXCEL’)

Una vez concluida la corrida del balanceo, este guarda los resultados en un archivo de Matlab que se autonombra results.mat, lo que permite analizar posteriormente a la corrida todas las variantes calculadas por el algoritmo, lo que se realiza mediante el comando:

Selectresults(‘results.mat’)

Luego de introducido este comando aparecerá una gráfica (Fig. 3) representando las corrientes por las fase y la corriente por el neutro del circuito antes de realizar el balanceo (en su estado original) (fig.2.3.3).Mientras que en el prom del Matlab te muestra los resultados de las pérdidas en las líneas**,** corriente promedio por los conductores de fases y corriente por el conductor neutro del circuito inicial esto mismo resultados los dará para cada una de las reconexiones escogida

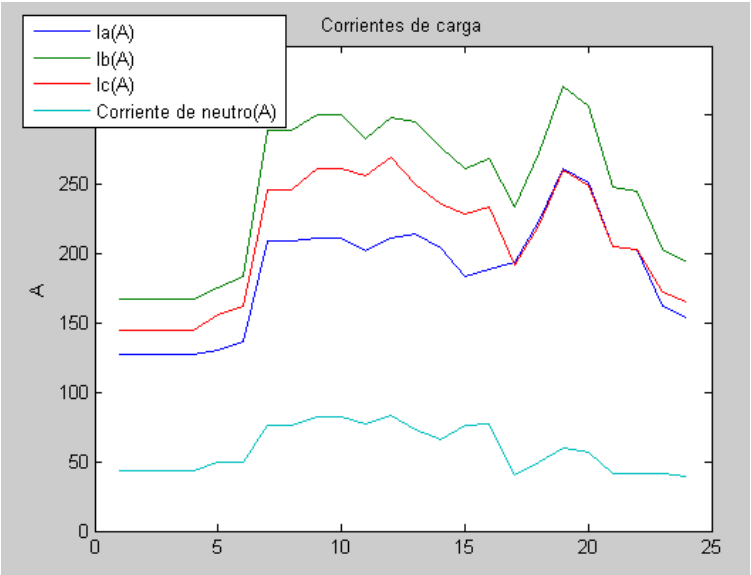


Fig. 2.3.3 Gráficos iniciales en el cto 3

Y otra gráfica de Resultados Promedio (Fig.2.3.4) con las posibles variantes de balanceo para distinto número de reconexiones, dando para cada uno de estos números de reconexiones: el ahorro máximo(%)(mejor variante), ahorro promedio(%)(de todas las variantes), corriente de neutro(%)(mejor variante) y corriente de neutro promedio(%)(de todas las variantes), lo cual facilita la selección del número de reconexiones más apropiado en cuanto a resultados para el circuito.

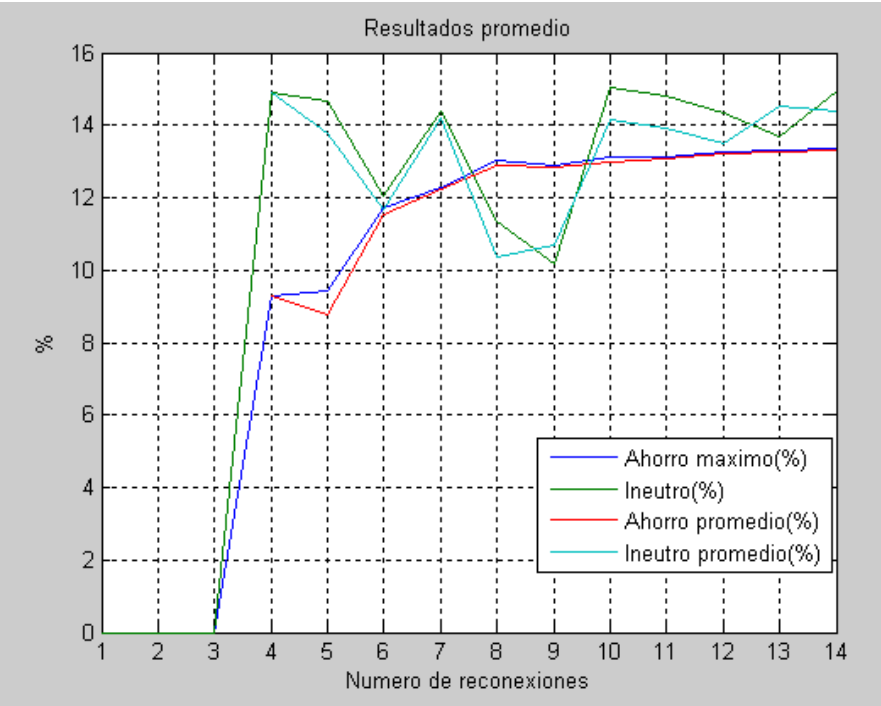


Fig. 2.3.4 Resultados promedio

También aparecerá un menú (fig.2.3.5) dando la posibilidad de terminar o explorar alguna de las variantes existentes para un número de reconexiones dado.

Fig.2.3.5: Barra de menú

Después de seleccionado el número de reconexiones, aparecerá como inicialmente una gráfica de cómo quedan las corrientes de fases y de neutro pero esta vez para las variantes con el número de reconexiones escogido. Y a partir de este gráfico se selecciona la variante deseada.

Una vez que se selecciona la variante, se muestran los resultados para la misma, como son: los gráficos de carga resultantes (Fig.2.3.6)**,** la lista de cambios en los

ramales (Fig.2.3.7), la lista de cambios en los bancos de transformadores (Fig.2.3.7) y las fases a que quedan conectados todos los elementos (Fig.2.3.8).

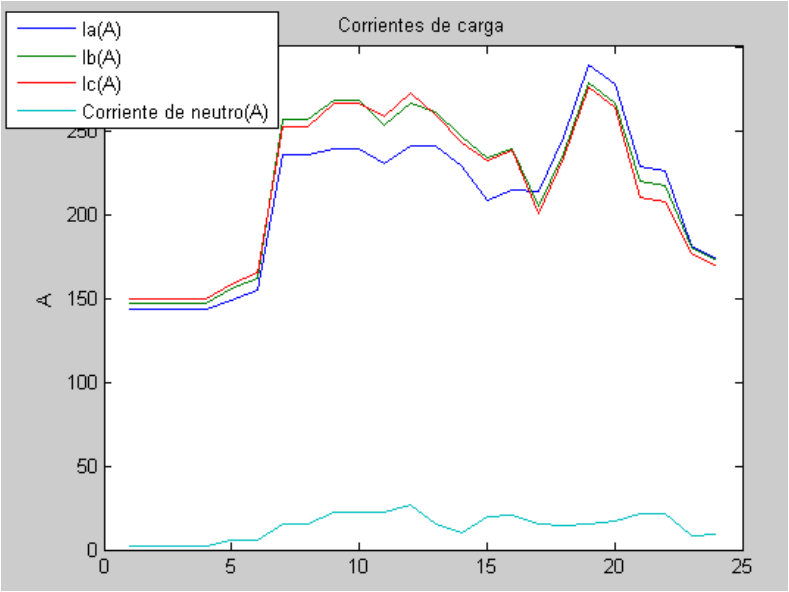


Fig.2.3.6 gráfico de carga después de las reconexiones del cto3

```
-----------------------------------------------
          Lista de Cambios en Ramales
-----------------------------------------------
    N1          N2          Antes     Despues
-----------------------------------------------
    'No4'      'No5'      '[1]A'     '[2]B'
    'No57'     'No58'     '[2]B'     '[1]A'
    'No71'     'No82'     '[2]B'     '[1]A'

-----------------------------------------------
          Lista de Cambios en Bancos
-----------------------------------------------
    N2              Antes     Despues
-----------------------------------------------
    'No12'       '[1]B'     '[2]C'
    'No13'       '[1]A'     '[3]C'
    'No33'       '[1]A'     '[3]C'
    'No44..'     '[3]C'     '[1]A'
    'No56'       '[3]C'     '[1]A'

-----------------------------------------------
```

Fig.2.3.7 Lista de cambios en transformadores y en ramales

Fases Propuestas

N1	N2	Ramal	Carga
'SUB'	'No1'	'[1]ABC'	'[2]B'
'No1'	'No2'	'[1]ABC'	'[3]C'
'No2'	'No3'	'[1]ABC'	'[6]AC'
'No3'	'No4'	'[1]ABC'	'[1]'
'No4'	'No5'	'[2]B'	'[1]B'
'No4'	'No6'	'[1]ABC'	'[6]AC'
'No6'	'No7'	'[1]ABC'	'[1]'
'No7'	'No8'	'[1]ABC'	'[3]BC'
'No8'	'No9'	'[1]ABC'	'[3]CAB'
'No9'	'No10'	'[1]ABC'	'[1]'
'No10'	'No11'	'[2]BC'	'[2]C'
'No11'	'No12'	'[2]BC'	'[2]C'
'No9'	'No13'	'[1]ABC'	'[3]C'
'No13'	'No14'	'[1]ABC'	'[1]'
'No14'	'No15'	'[1]ABC'	'[1]AB'
'No15'	'No16'	'[1]ABC'	'[2]BA'

Fig.2.3.8: fases en que quedan conectados los elementos

Luego de escoger la variante se realizan los cambios propuestos en Radial y se hace una corrida de un flujo trifásico antes y después de los cambio para ver en que valor variaron las pérdidas en las líneas, las corrientes por las fases y la corriente por el neutro.

Capítulo 3. Aplicación y resultados del algoritmo de balanceo

En este capítulo se pretende presentar los resultados realizadas con el algoritmo del balanceo mostrado en el capítulo anterior. Para esto se escogieron varios circuitos de la ciudad de Santa Clara que presentaban problemas con el desbalance entre los que se encuentran el circuito #1, circuito #2, circuito #3 y el Circuito #7.

Dentro de las tareas realizadas se hizo una actualización a lo largo de todos los circuitos para correr el software, y evitar que la base de datos de los circuitos no se corresponda con lo que realmente existe

Seguidamente se corrieron los circuitos siguiendo el algoritmo del balanceo. Este arroja una serie de resultados para hacer cambios en el circuito, por lo que antes de hacer cualquier cambio se debe hacer un análisis para que la variante a escogida sea la más adecuada.

Los resultados del Radial en ambos casos es decir antes y después de los cambios serán comparados con los del programa BALANCEO para comprobar si hay similitudes entre ellos

3.1 Análisis del Circuito #1

Este circuito de 4.16 kV, consta de 37 ramales trifásicos (NR=37), 4 bancos de tres transformadores monofásicos, 15 bancos de dos transformadores monofásicos y 7 transformadores monofásico, y un transformador trifásico, la carga es aproximadamente de 1400 kW y es mayoritariamente residencial por lo que se suministra por los transformadores monofásico o por los transformadores de alumbrado en el caso de los bancos de dos o tres transformadores.

Determinado el circuito, se ejecutó el flujo de potencia trifásico para obtener los estimados iniciales de pérdidas de energía diarias, corriente de neutro y corrientes por las fases. Además se hace una comparación con los resultados que nos

brinda el BALANCEO de las pérdidas de energía en líneas y corriente por el neutro (Tab.3.1):

Tab.3.1: Estimados iniciales del circuito #1

Parámetros	**Estimados del Radial**	**Estimados del Balanceo**
Corriente por la fase A (A)	100	
Corriente por la fase B (A)	123	
Corriente por la fase C (A)	229	
Corriente por neutro (A)	117	99.81
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	167	141.28

Se hace la corrida del circuito siguiendo el algoritmo del balaceo y no encuentra solución posible de ahorro variando los transformadores monofásicos y los ramales monofásicos, por lo que se corre nuevamente dándole la posibilidad de variar los ramales bifásicos y los bancos de dos transformadores, esta vez arrojando soluciones de 6 reconexiones hasta 15 con diferentes variantes, donde se debe escoger una variante que no tenga un número grande de reconexiones para evitar la complejidad del trabajo pero que a la vez tenga el máximo ahorro posible. En la (Fig.3.1) se muestran las soluciones posibles:

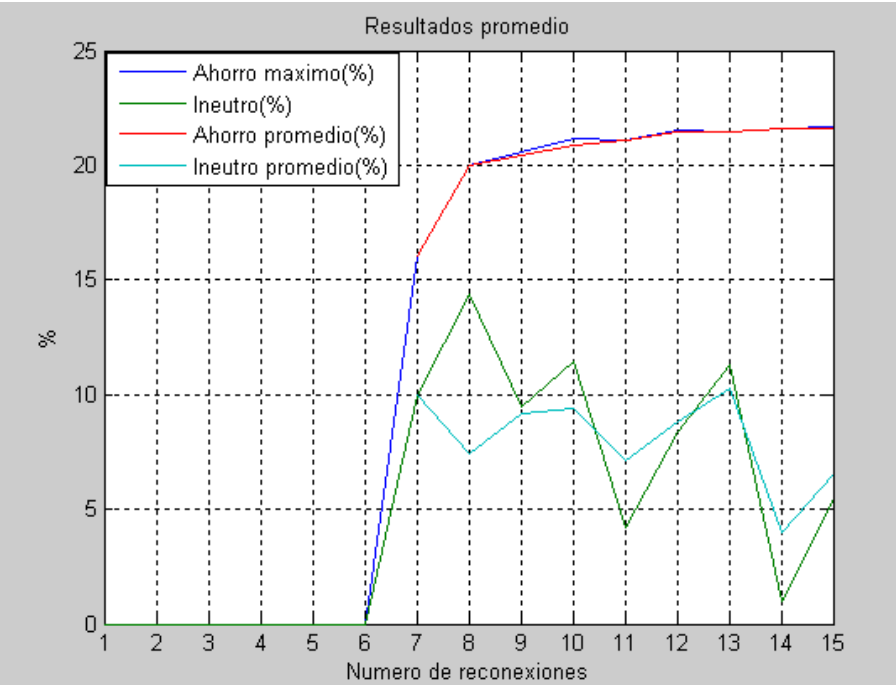


Fig.3.1: Variante de reconexiones del circuito #1

En este caso se decidió tomar la variante 3 de 8 reconexiones, los cambios propuestos para esta variante están expuestos en la (tab.3.2):

Tab.3.2: Lista de cambio de la variante 3 de 8 reconexiones

N1	N2	Ramal	Carga	TA	TF 1	TF 2
	No5		2T	B→B	C→A	
	No11		2T	C→A	A→B	
	No12		2T	C→A	A→C	
	No14		2T	A→A	C→B	
	No19		2T	C→B	B→A	
	No24		2T	B→B	C→A	
	No26*		2T	C→A	B→B	
	No28		2T	C→B	B→C	

Esta variante comprende los 8 cambios en bancos de dos transformadores haciendo cambios de fase en el transformador de alumbrado y en el transformador de fuerza o en uno de los dos.

Después de realizados estos cambios se ejecuta un flujo trifásico en el circuito modificado para hacer una comparación con resultados del circuito inicial y ver si se aprecia una mejora en el balance de la carga y una disminución de la corriente por el neutro, además de verificar si se produce un ahorro de energía .Los resultados arrojado por el radial son los mostrado en la (tab.3.3):

Tab.3.3: Reportes del programa balanceo y del Radial antes y después de los cambios

Parámetros	Radial antes	Radial después	balanceo
Corriente por la fase A (A)	100	133	
Corriente por la fase B (A)	123	155	
Corriente por la fase C (A)	229	157	
Corriente por neutro (A)	117	15	6
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	167	88	113

En las (fig.3.2) y (fig.3.3) se puede observar gráficamente las mejoras cuanto a balance de las corrientes de fase y corriente de neutro:

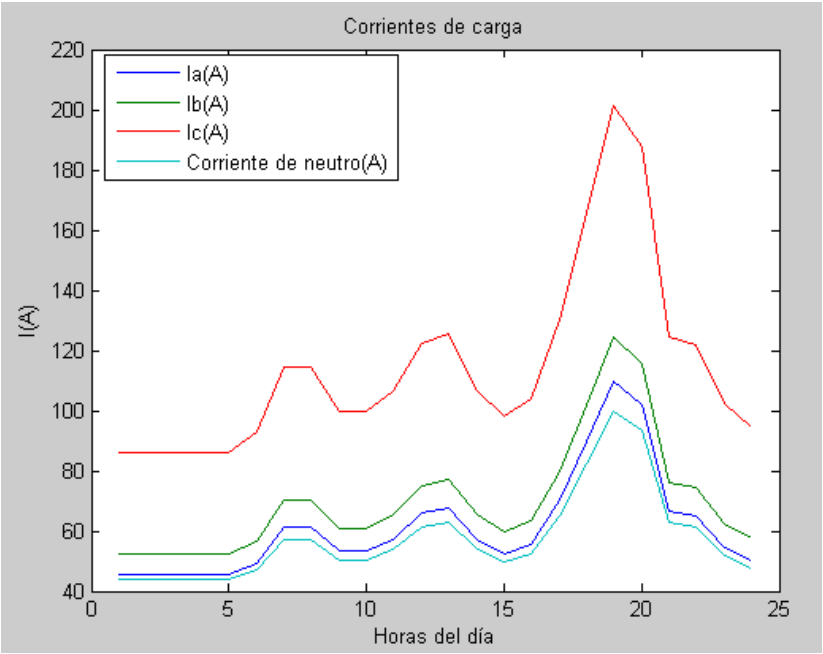


Fig.3.2: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito inicial

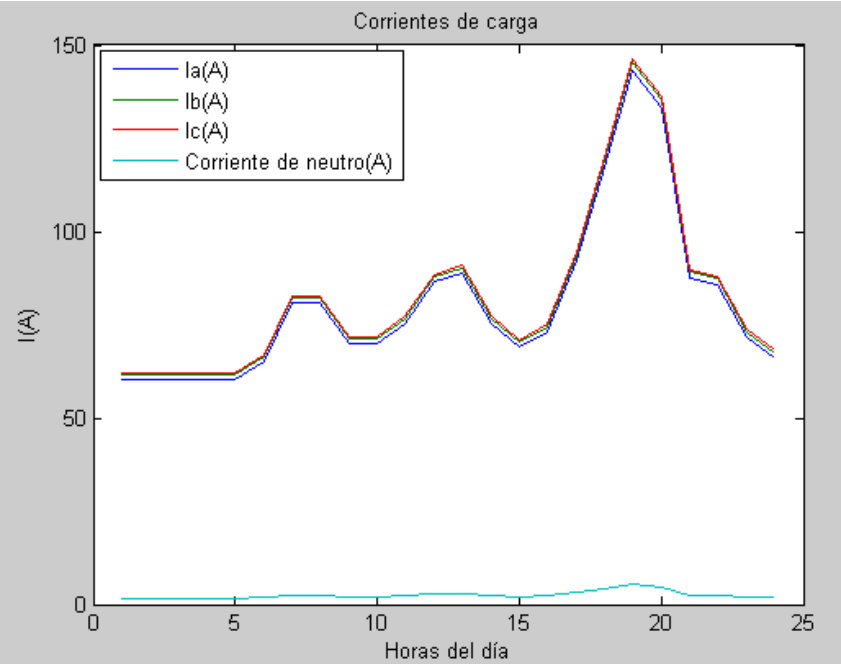


Fig. 3.3: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito modificado

Haciendo un análisis de los resultados por el Radial en ambos casos se puede apreciar la mejora de las condiciones del circuito en cuanto al balance de su

carga, incluso la corriente por el neutro disminuyo a un 13% de la inicial y un ahorro de energía de un 43% lo que representa 79 kWh al día lo que produciría un ahorro anual de 28,8 MWh

3.2 Análisis del Circuito #2

El siguiente circuito de 4.16 kV está formado por 15 ramales monofásicos, 15 ramales bifásicos y 34 ramales trifásicos (NR=64), 24 transformadores monofásicos, 20 bancos de dos transformadores monofásicos y 2 bancos de tres transformadores monofásicos (NT=46), contiene una carga variada alrededor de los 1000 kW

Determinado el circuito, se ejecutó el flujo de potencia trifásico para obtener los estimados iniciales (Tab.3.4):

Tab.3.4: Estimados iniciales del circuito #2

Parámetros	**Estimados del Radial**	**Estimados del Balanceo**
Corriente por la fase A (A)	306	
Corriente por la fase B (A)	241	
Corriente por la fase C (A)	292	
Corriente por neutro (A)	63	70
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	902	977

Se hace la corrida del circuito siguiendo el algoritmo del balaceo arrojando soluciones de 1 reconexiones hasta 6 con diferentes variantes. En la (Fig.3.4) se muestran las soluciones posibles

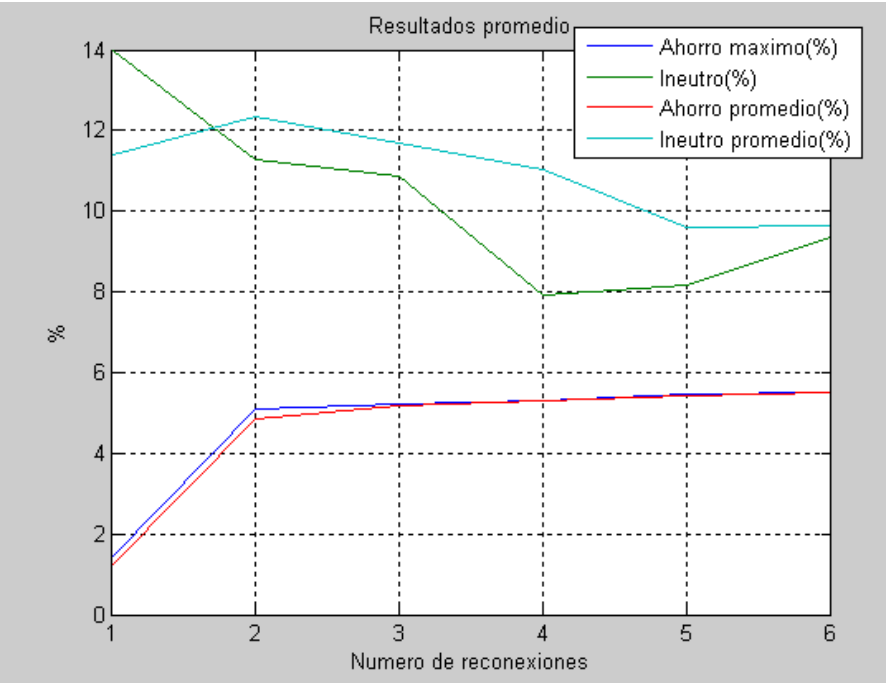


Fig.3.4: Variante de reconexiones del circuito #2

En este caso se decidió tomar la variante 3 de 4 reconexiones, los cambios propuestos para esta variante están expuestos en la (tab.3.5):

Tab.3.5: Lista de cambio de la variante 3 de 4 reconexiones

N1	N2	Ramal	Carga	TA	TF 1	TF 2
No7	No8	A→B				
No7	No9	B→C				
	No67		1T	C→B		
	No61		1T	C→A		

Esta variante comprende cambios de dos transformadores monofásico y dos en ramales monofásico Después de realizados estos cambios se ejecuta el flujo trifásico en el circuito modificado para hacer la comparación de los resultados, con los obtenidos inicialmente. Los resultados arrojados por el radial son los mostrados en la (Tab.3.6):

Tab.3.6: Reportes del programa balanceo después de los cambios y del Radial antes y después de los cambios

Parámetros	Radial antes	Radial después	balanceo
Corriente por la fase A (A)	306	262	
Corriente por la fase B (A)	241	248	
Corriente por la fase C (A)	292	291	
Corriente por neutro (A)	63	27	20
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	902	877	925

En las (fig.3.5) y (fig.3.6) se puede observar gráficamente las mejoras cuanto a balance de las corrientes de fase y corriente de neutro:

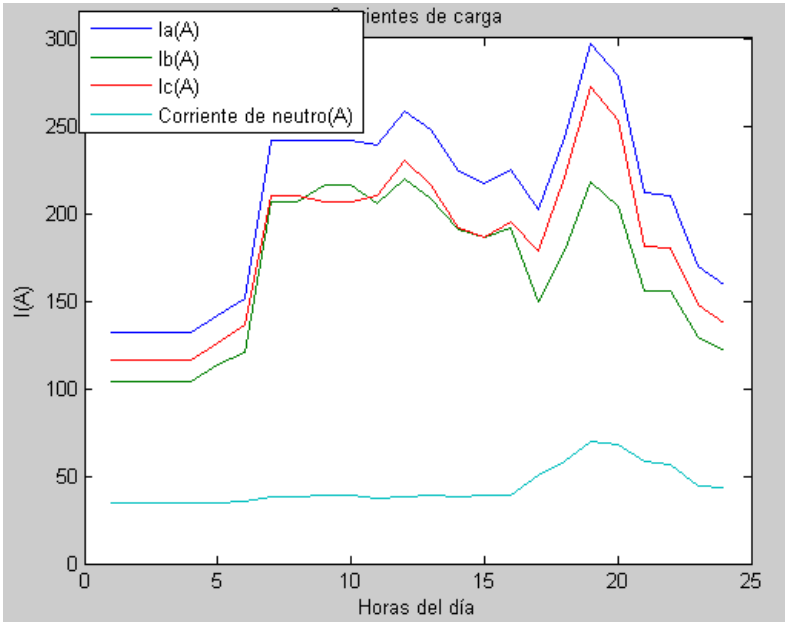


Fig.3.5: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito inicial

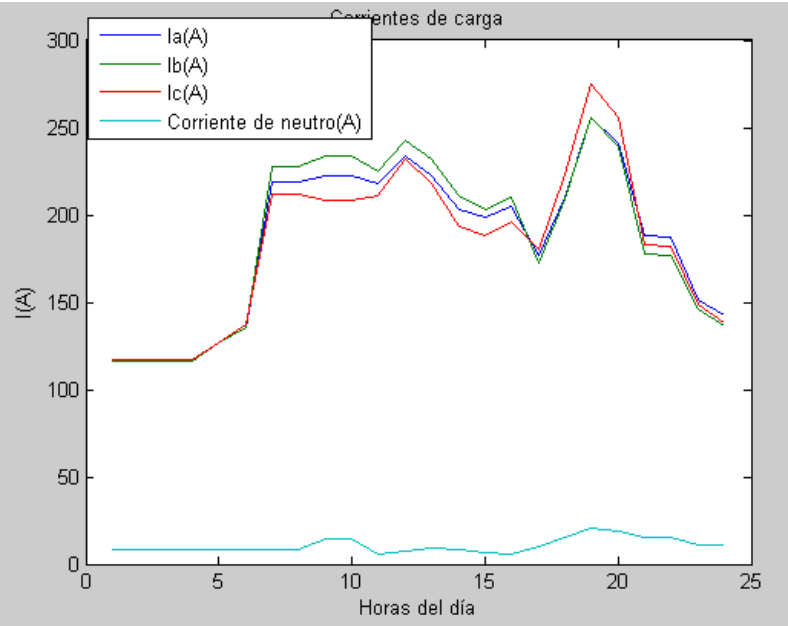


Fig.3.6: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito modificado

Haciendo un análisis de los resultados en ambos casos por el Radial se puede apreciar que hubo una reducción de la corriente por el neutro de un 42.8% también se puede apreciar la mejora de las condiciones del circuito en cuanto al balance de su carga y el ahorro diario de un 3% que son 25 kWh diario lo que representaría un ahorro anual de 9.1 MWh

3.3 Análisis del Circuito #3

El siguiente circuito d 4.16 kV consta de 12 ramales monofásicos, 16 ramales monofásicos, 60 ramales trifásicos (NR=88) ,33 transformadores monofásicos ,22 bancos de dos transformadores monofásicos, 10 bancos de tres transformadores monofásicos y 4 transformadores trifásico (NT=69), con una carga aproximada a los 1700 kW.

Como se hizo en los casos anteriores, se ejecutó el flujo de potencia trifásico para obtener los estimados iniciales de pérdidas de energía diarias, corriente de neutro y corrientes por las fases. Además se hace una comparación con los resultados que nos brinda el balanceo de las pérdidas de energía en líneas y corriente por el neutro

Tab.3.7: Estimados iniciales del circuito #3

Parámetros	Estimados del Radial	Estimados del Balanceo
Corriente por la fase A (A)	317	
Corriente por la fase B (A)	310	
Corriente por la fase C (A)	265	
Corriente por neutro (A)	52	83
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	1715	1825

Se hace la corrida del circuito siguiendo el algoritmo del balaceo arrojando soluciones de 3 reconexiones hasta14 con diferentes variantes. En la (Fig.3.7) se muestran las soluciones posibles:

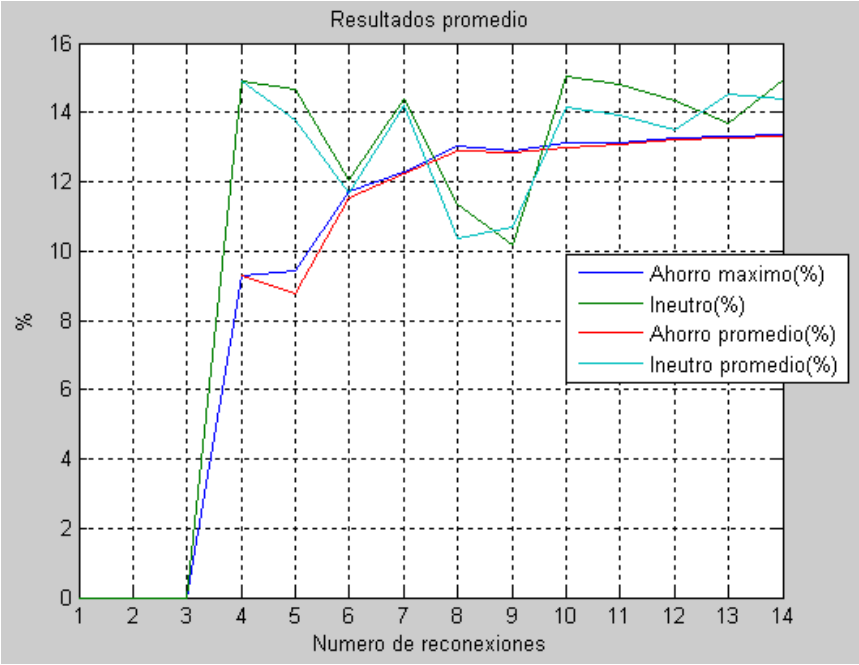


Fig.3.7: Variante de reconexiones del circuito #3

En este caso se decidió tomar la variante 2 de 8 reconexiones, los cambios propuestos para esta variante están expuestos en la (Tab.3.8):

Tab.3.8: Lista de cambio de la variante 2 de 8 reconexiones

N1	N2	Ramal	Carga	TA	TF 1	TF 2
No4	No5	A→B				
No57	No58	B→A				
No71	No82	B→A				
	No12		1T	B→C		
	No13		1T	A→C		
	No33		1T	A→C		
	No44..		1T	C→A		
	No56		1T	C→A		

Esta variante comprende los 5 cambios en transformadores monofásicos y 3 en ramales monofásicos Después de realizados estos cambios se ejecuta otro flujo trifásico en el circuito modificado para hacer una comparación con resultados del circuito inicial y hacer la comparación con los resultados obtenidos en ambos casos, se pueden ver los resultados en la (Tab.3.9):

Tab.3.9: Reportes del programa balanceo y del Radial antes y después de los cambios

Parámetros	Radial antes	Radial después	Balanceo
Corriente por la fase A (A)	317	298	
Corriente por la fase B (A)	310	286	
Corriente por la fase C (A)	265	317	
Corriente por neutro (A)	52	24	26
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	1715	1402	1523

En las (Fig.3.8) y (Fig.3.9) se puede observar gráficamente las mejoras cuanto a balance de las corrientes de fase y corriente de neutro:

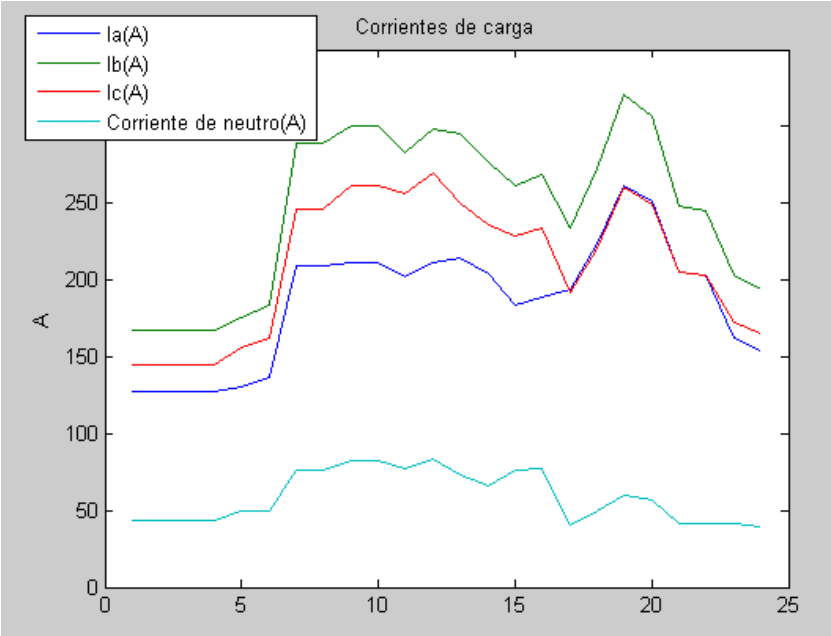


Fig.3.8: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito inicial

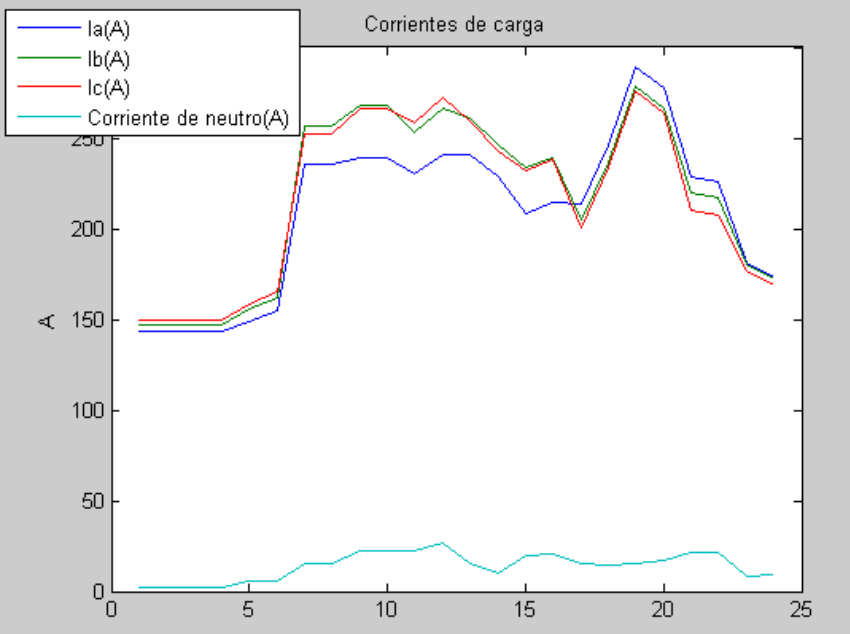


Fig. 3.9: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito modificado

Haciendo un análisis de los resultados arrojados por el Radial se puede ver una mejoría en el balance de las corrientes de fase incluso una disminución de la

corriente por el neutro de aproximadamente un 50% con respecto a la del circuito original y un ahorro de 302 kWh representando un ahorro anual de 114 MWh

3.3 Análisis del Circuito #7

El siguiente circuito de 4.16 kV es un circuito más pequeño que los analizados en los anteriormente y consta de 6 ramales monofásico, 3 ramales bifásicos y 42 ramales trifásicos (NR=51) además de 14 transformadores monofásicos ,7 bancos de dos transformadores monofásicos y 12 bancos de tres transformadores monofásicos (NT=33) con una carga aproximada de 500 kW

Se ejecutó el flujo de potencia trifásico para obtener los estimados iniciales de pérdidas de energía diarias. Además se hace una comparación con los resultados que nos brinda el balanceo de las pérdidas de energía en líneas y corriente por el neutro (Tab.3.10):

Tab.3.10: Estimados iniciales del circuito #7

Parámetros	**Estimados del Radial**	**Estimados del Balanceo**
Corriente por la fase A (A)	83	
Corriente por la fase B (A)	72	
Corriente por la fase C (A)	59	
Corriente por neutro (A)	10	22
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	78	72.5

Se hace la corrida del circuito siguiendo el algoritmo del balaceo arrojando soluciones de 6 reconexiones hasta 11 con diferentes variantes, donde se debe escoger una variante que no tenga un numero grande de reconexiones para evitar la complejidad del trabajo pero que a la vez tenga el máximo ahorro posible. En la (Fig.3.10) se muestran las soluciones posibles:

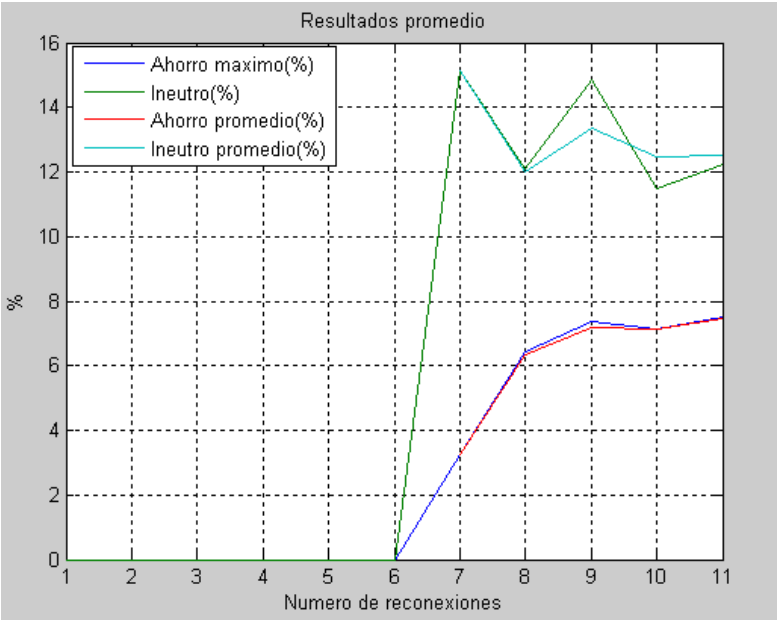


Fig.3.10: Variante de reconexiones del circuito #7

En este caso se decidió tomar la variante 3 de 8 reconexiones, los cambios propuestos para esta variante están expuestos en la (tab.3.11):

Tab.3.11: Lista de cambio de la variante 3 de 8 reconexiones

N1	N2	Ramal	Carga	TA	TF 1	TF 2
No5	No23	A→B				
	No1c		1T	A→B		
	No1e		1T	B→A		
	No2		1T	C→B		
	No4		1T	C→B		
	No1d4		1T	B→C		
	No1d6		1T	B→A		
	No1f1a		1T	C→B		

Esta variante comprende los cambios de fase un ramal monofásico y el cambio de fase de 6 transformadores monofásicos luego de ejecutado estos cambios en el circuito inicial se hace una corrida del flujo trifásico y se hace una comparación

entre los resultados del circuito inicial y el circuito con los cambios realizados estos resultados son mostrado en la (tab.3.1):

Tab.3.11: Reportes del programa balanceo y del Radial antes y después de los cambios

Parámetros	Radial antes	Radial después	balanceo
Corriente por la fase A (A)	83	76	
Corriente por la fase B (A)	72	71	
Corriente por la fase C (A)	59	66	
Corriente por neutro (A)	10	9	7
Pérdidas de Energía en Líneas (kWh)	78	74	68

En las (Fig.3.11) y (Fig.3.12) se puede observar gráficamente las mejoras cuanto a balance de las corrientes de fase y corriente de neutro:

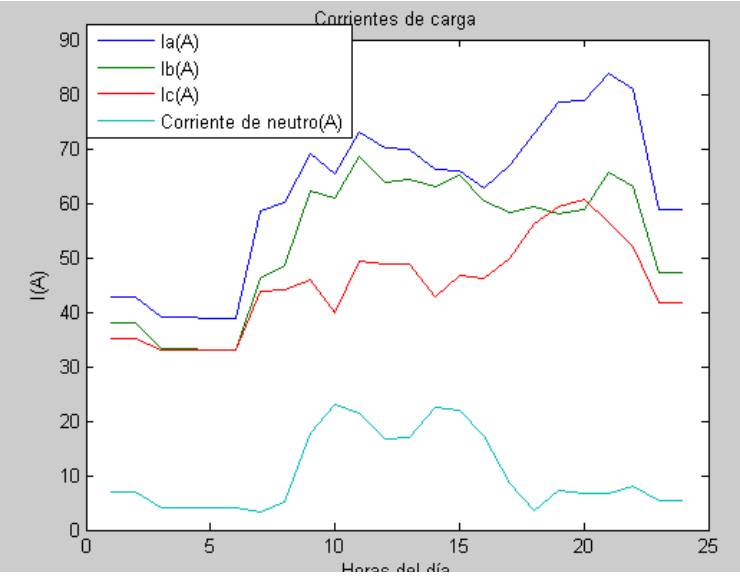


Fig.3.11: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito inicial

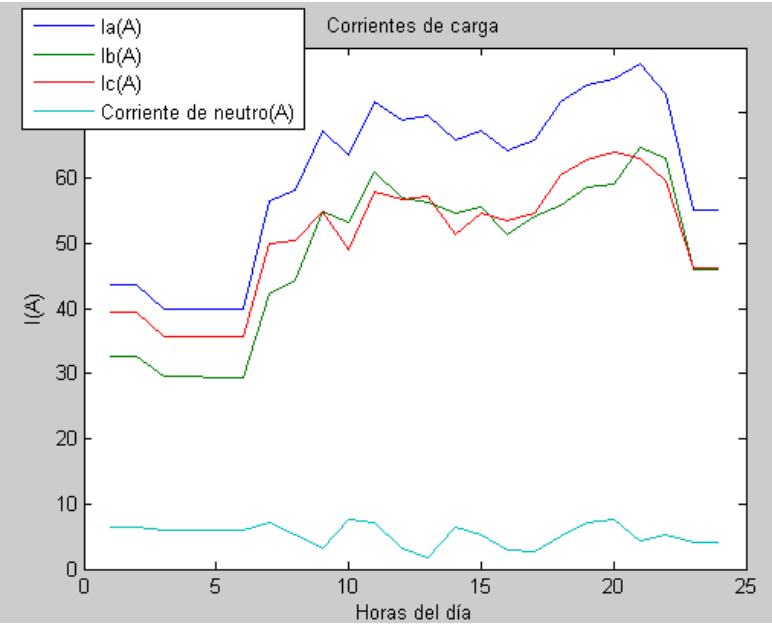


Fig.3.12: Corrientes de fases y corriente de neutro en el circuito modificado

En este circuito los resultados son un poco más discreto debido a sus característica de ser un circuito más pequeño como se decía anteriormente de hacer el análisis del mismo, pero se ve una reducción de las pérdidas de un 5.2% que son 4 kWh representando un ahorro anual de 1.46 MWh además de alguna mejora en el balance de las corrientes de fase

Con respecto al ahorro de energía producto de la reconexiones, esto solo puede ser estimado, pues al no implementarse las reconexiones no existen mediciones registradas en el interruptor principal del circuito con las cuales se puedan llevar a cabo un análisis más exacto del efecto que produjo la aplicación del Algoritmo Genético simple (SGA) en la red. No obstante, si tenemos en cuenta que el ahorro estimado por el Radial en cada uno de los circuitos balanceado en el trabajo se produce un ahorro de 410 kWh lo que al año representa uno 149,65 MWh, lo que da entender que de aplicarse este procedimiento a nivel nacional el ahorro sería significativo

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con el presente trabajo puede arribarse a las siguientes conclusiones:

1. Se ha comprobado la presencia de un gran desbalance en los circuitos de distribución primaria de la ciudad de Santa Clara.
2. El problema del balance de carga en los circuitos de distribución primaria puede ser formulado y resuelto mediante un Algoritmo Genético
3. En los 4 circuitos analizados se logró reducir considerablemente la corriente por el neutro, lo que permitiría la utilización la protección de falla a tierra del NULEC.
4. Aunque no se tienen resultados prácticos con la aplicación de las variantes, el Radial avala la veracidad de los resultados estimados por dicho método.
5. De haberse aplicado las variantes ofrecida por el SGA en los 4 circuitos, estas hubiera implicado un ahorro de 149.65 MWh al año.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar las variantes de reconexión obtenidas por el método de optimización para los circuitos analizados y así llevar a la práctica lo demostrado teóricamente en el trabajo
2. Extender el estudio a otros circuitos de la provincia en aras de poder balancear la mayor parte de los circuitos primarios, para lograr un servicio más eficiente.
3. Prestar atención a la viabilidad, factibilidad y eficacia de los SGA a la hora de balancear los circuitos primarios
4. Mantener un control minucioso de la actualización de los monolineales, teniendo en cuenta todas las transformaciones que experimenten los circuitos por cuestiones de mantenimiento, reconfiguración, alargamiento, seccionalizaciones entre otras, con lo cual se logrará una mayor eficiencia en próximos trabajos investigativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Blume, L. F. (1965). Transformer Engineering. John Willey and Sons, New York.

[2]. Casaravilla, G., Echinope, V. Desbalance - Estudio de alternativas para su estimación. Extraído el 27 de abril de 2009, de: http://www.monografias.com/trabajos11

[3]. Chen, T. H., Yang, W. C., Guo, T.Y. & Pu, G. C. (2000). Modeling and analysis of asymmetrical three-phase distribution transformer banks with mid-tap connected to the secondary neutral conductor. EPRI, 54, 83–89.

[4]. Chen, T. H., Cherng, J.T. (2000). Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm.IEEE Transactions on Power Systems, 15(3), 994-1000.

[5]. Chen, T. H., Yang, W. C. (2001). Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding. IEEE Transactions on Power Delivery, 16(4), 710-717.

[6]. Chiou, J. P., Chang, C. F., Su, C.T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems, 20(2), 668-674.

[7]. Cobas Pereira, M. F. (2006). La Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica. ISPJAE.

[8]. Espinosa, L. (1990). Sistemas de Distribución. Limusa, México.

[9]. Gálvez, D. (1998). Algoritmos Genéticos. Universidad Central "Marta Abreu de las Villas".

[10]. Gatta, F. M., Iliceto, F., Lauria, S., Masato, P. (2002). Analysis of unsymmetrical transmission distribution systems. Application to Insulated Shield Wires Schemes. L'Energia Electrica, 79.

[11]. Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

[12]. Gonen, T. (1986).Electric Power Distribution System Engineering. Mc-Graw Hill.

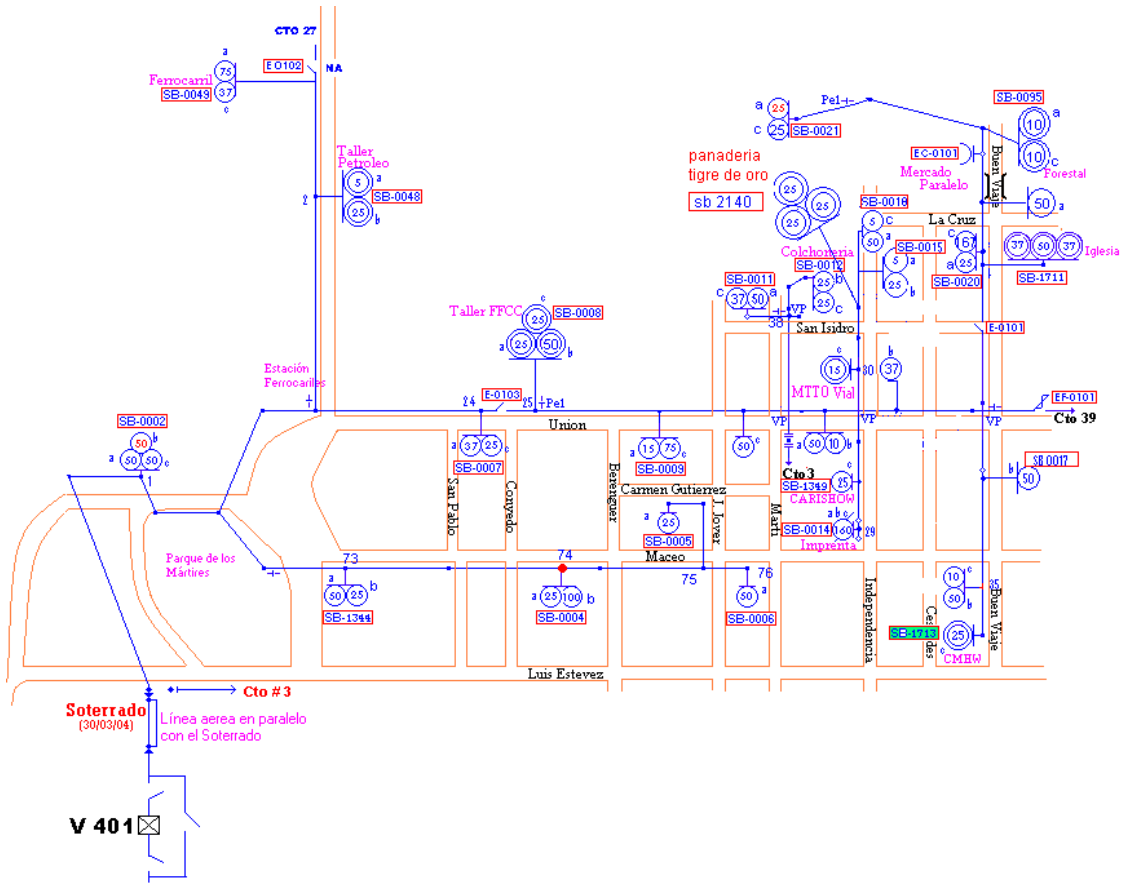
[13]. Hong, Y. Y., Ho, S.Y. (2003). Genetic algorithm based network reconfiguration for loss minimization in distribution systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003, 1, 490.

[14]. Mori, H., Ogita, Y. (2000). A parallel tabu search based method for reconfigurations of distribution systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, 1, 73-78.

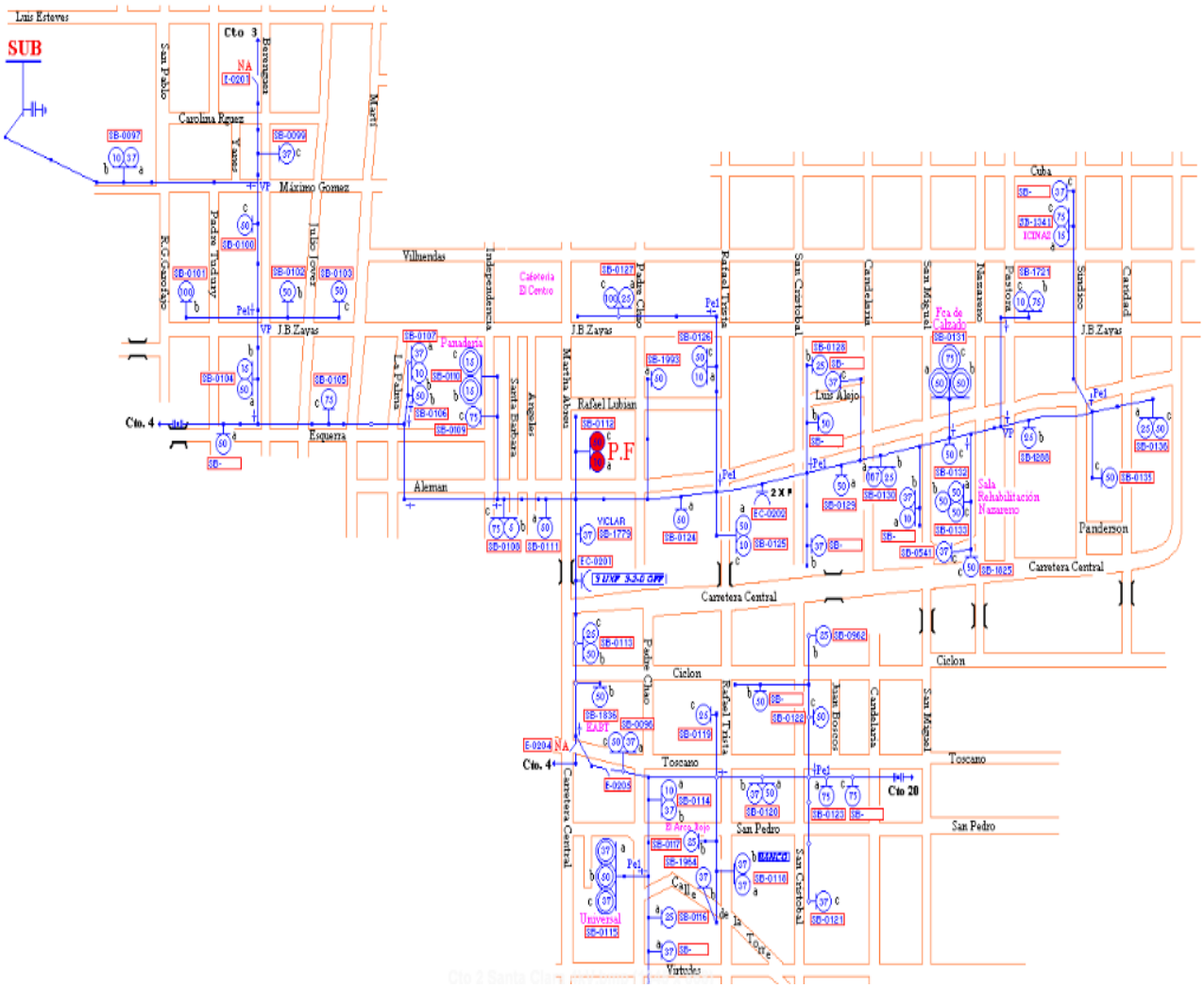
[15]. Su, C. T., Changand, C. F., Chiou, J.P. (2005). Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. EPRI, 75 (2-3), 190-199.

ANEXOS

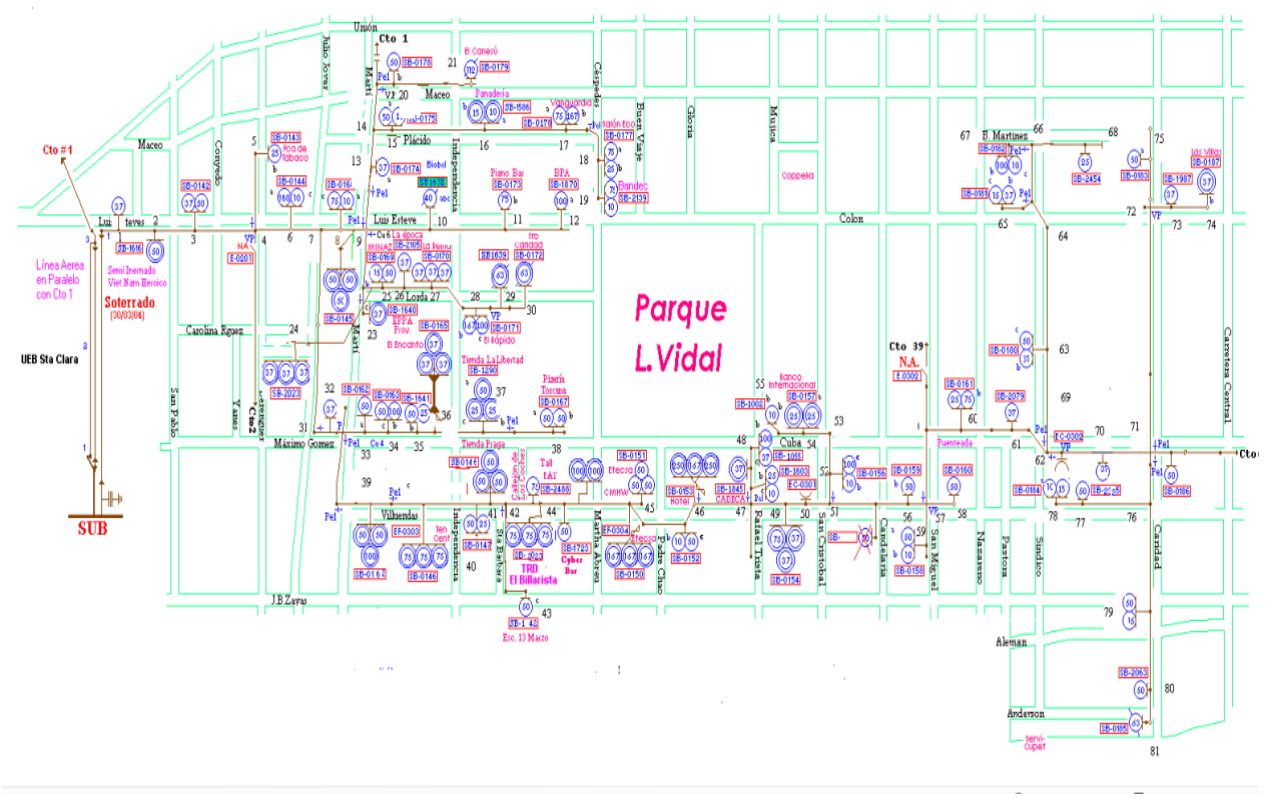
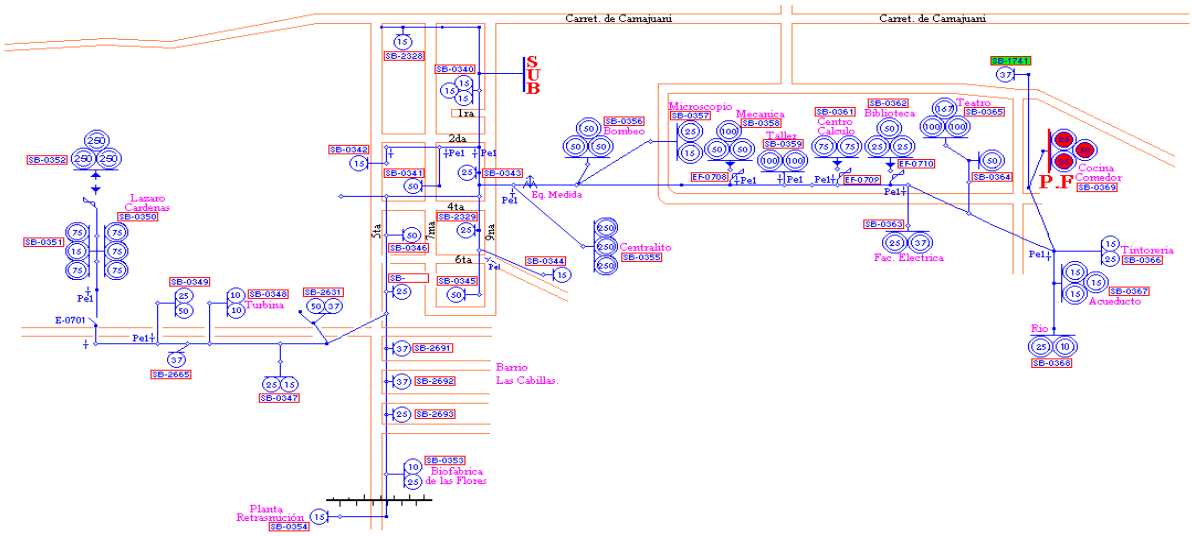
Anexo I Monolineal del circuito #1



Anexo II Monolineal del circuito #2



Anexo III Monolineal del circuito #3



Anexo VI Monolineal del circuito #7