

SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE BALANCE DE FASES Y RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS BAJO UN MODELAMIENTO TRIFÁSICO USANDO SIMULATED ANNEALING

RESUMEN

Las pérdidas técnicas en los sistemas de distribución constituyen uno de los factores fundamentales a optimizar. Entre las técnicas más eficientes para reducir pérdidas está la reconfiguración de alimentadores primarios y el balance de fases. En este artículo se presenta un nuevo enfoque que minimiza los costos operativos y de inversión teniendo en cuenta la curva de carga del sistema efectuando un planeamiento de la operación tanto en el corto como en el mediano plazo y un modelamiento tanto trifásico como monofásico equivalente. El algoritmo es comprobado en sistemas de prueba de la literatura especializada obteniendo resultados promisorios.

PALABRAS CLAVES: reconfiguración, sistemas de distribución, simulated annealing, modelo trifásico, balance de fases.

ABSTRACT

Technical losses in distribution systems are a fundamental aspect to optimize. Reconfiguration of primary feeders and load phase balance are efficient techniques to reduce technical loss in distribution systems. This paper presents a novel method which minimizes operative and inversion costs considering the load curve and a three-phase and mono-phase model. The algorithm is applied in a test system showing good results.

KEYWORDS: *Reconfiguration, distribution systems, simulated annealing, three phase model, load phase balance.*

1. INTRODUCCIÓN

Las pérdidas técnicas en los sistemas de distribución constituyen una desventaja competitiva para las empresas en los nuevos mercados. Una manera eficiente y económica de reducir este tipo de pérdidas es a través del balance de fases y la reconfiguración de alimentadores primarios los cuales convencionalmente son planteados para reducir las pérdidas de potencia pico.

Los sistemas eléctricos colombianos en su mayoría no cuentan con mecanismos SCADA (supervisory control and data acquisition) por lo tanto no pueden realizar cambios topológicos en tiempo real. Dado lo anterior se plantea una metodología en la cual se planea la operación para un periodo de tiempo; este planeamiento considera dos etapas: en la primera se efectúa un balance de fases y en la segunda se realiza una reconfiguración de los alimentadores.

Esta metodología modela la curva de carga discretizada en varios intervalos. En la función objetivo considera las pérdidas de energía y los costos de inversión en nuevos tramos de línea e interruptores. El sistema es modelado trifásicamente con el fin de tener un mayor acercamiento a la operación real.

Civalar [1] propone el primer algoritmo para la reducción de pérdidas. El algoritmo parte de una solución factible, es decir, la red operando radialmente, ésta puede corresponder a la configuración actual del sistema.

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

Ingeniero Electricista, MSc
Profesor Auxiliar
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alejandrog@ohm.utp.edu.co

JUAN C. GALVIS MANSO

Ingeniero Electricista, MSc.
Profesor catedrático.
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira.
juangalvis@ohm.utp.edu.co

RAMÓN A. GALLEGO RENDÓN

Ingeniero Electricista, PhD.
Profesor Titular.
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira.
ragr@utp.edu.co

Posteriormente, uno de los enlaces es cerrado formando una malla. Se requiere un flujo de carga completo para determinar la operación de la red en estas condiciones. Para recuperar la radialidad, una de las ramas es abierta. Los criterios de entrada y salida de las ramas son heurísticos.

En este tipo de metodologías denominadas constructivas existe la posibilidad de ser "atrapado" en un óptimo local. En todos los casos [2] el sistema es modelado para optimizar solo las pérdidas de potencia pico sin tener en cuenta la curva de carga y los costos de inversión.

En este trabajo se utiliza una metodología combinatorial que permite encontrar soluciones de alta calidad con un tiempo computacional relativamente bajo.

El artículo es organizado de la siguiente forma:

Inicialmente se presenta el planteamiento del problema de reconfiguración. Posteriormente se muestra el modelo matemático propuesto bajo el enfoque de optimizar la operación y la inversión en nuevas suplencias. Luego se presenta el modelamiento trifásico del sistema. Finalmente se muestra el algoritmo de optimización propuesto y los resultados obtenidos con un sistema de la literatura especializada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Balance de fases

El balance de fases consiste en transferir carga entre fases de cada uno de los nodos del sistema, esta transferencia se realiza de forma manual teniendo en cuenta los diferentes tipos de conexión de las cargas (Y,D). El balance total del sistema no es posible conseguirlo debido a las características de desbalance propias de las cargas y las configuraciones de las líneas (monofásicas, trifásicas, etc)

2.2 Reconfiguración de alimentadores primarios

Los sistemas de distribución son operados en forma radial aunque pueden contar con tramos de línea enmallados que no son conectados. Mediante estos tramos, denominados suplencias, la red puede transferir carga conectando suplencias y desconectando tramos de línea para conservar la radialidad.

La reconfiguración de alimentadores primarios busca establecer una red radial que optimice la operación del sistema de distribución mediante la conexión y desconexión de suplencias y tramos de línea. El concepto de optimización puede obedecer a varios aspectos como son:

- Minimizar las pérdidas de potencia.
- Minimizar las pérdidas de energía.
- Aumentar la cargabilidad.
- Disminuir el grado de desbalance.
- Mejorar los perfiles de tensión.
- Optimizar las rutas de alimentación en ambientes de mercado spot.

Normalmente una acción en alguno de estos aspectos repercute de forma positiva en los demás.

En redes con alto grado de inversión tecnológica se cuenta con sistemas SCADA (supervisory control and data acquisition.) que pueden modificar la disposición topológica en tiempo real, en este sentido la reconfiguración se convierte en un problema operativo de muy corto plazo. No obstante en sistemas que no cuenten con este tipo de tecnología, la reconfiguración debe plantearse para horizontes de planeamiento del orden de 1 año (aunque la metodología es general y permite utilizar un intervalo de tiempo mayor), por tal razón la curva de carga debe llevarse en cuenta optimizando las pérdidas de energía; la reconfiguración se presenta como un método de planeamiento operativo de la red y no reemplaza las políticas de planeamiento de la distribución que implementan en el sistema.

La función objetivo puede tener en cuenta también inversiones en nuevos tramos de línea (suplencias) los cuales al ser construidos pueden reducir las pérdidas del sistema.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

3.1 Balance de fases

El balance de fases es planteado para minimizar las pérdidas de energía y en algunos casos las pérdidas de potencia pico. La función objetivo tiene en cuenta estos costos teniendo en cuenta a las restricciones de flujo de carga y límites operativos. El modelo completo es presentado en [3]

3.2 Reconfiguración

La función objetivo planteada considera los costos operativos dados por las pérdidas de energía y los costos de inversión en nuevos tramos de línea e instalación de interruptores. De esta forma, las pérdidas modelan el problema operativo mientras las nuevas líneas lo hacen con el problema de inversión.

$$\text{Min } F_I + F_O + F_P \quad (1)$$

sa

$$F_I = \sum_{k=1}^M C_k \cdot L_k \quad (2)$$

$$F_O = C_T \cdot \sum_{t=1}^T h_t \cdot \sum_{i=1}^N R_i \cdot \frac{P_{it}^2 + Q_{it}^2}{V_{it}^2} \quad (3)$$

$$F_P = C_p \cdot P_{pp} \quad (4)$$

$$P_{it} = f_P(V_{it}, \theta_{it}) \quad (5)$$

$$Q_{it} = f_Q(V_{it}, \theta_{it}) \quad (6)$$

$$V_{\min} < V_{it} < V_{\max} \quad (7)$$

$$P_{\min} < P_{it} < P_{\max} \quad (8)$$

$$\prod \lambda_F = 1 \quad (9)$$

en donde

F_I : costos de inversión.

F_O : costos de operación.

F_P : costos de pérdidas de potencia pico.

k : índice de las suplencias a construir.

t : índice de los periodos de tiempo considerados

i : índice de las líneas del sistema radial

C_k : costo de construir la suplencia k .

L_k : variable de decisión booleana que indica si se construye o no la suplencia k .

C_T : costo de una unidad de energía comprada.

h_t : duración en horas del periodo de tiempo t

R_i : resistencia del tramo i de la red radial.

P_{it} : flujo de potencia activa por la línea i en el periodo t .

Q_{it} : flujo de potencia reactiva por la línea i en el periodo t .

V_{it} : voltaje en el nodo correspondiente al envío en la rama i en el periodo de tiempo t .

P_{pp} : pérdidas de potencia pico.

La función objetivo minimiza los costos de inversión (FI), operación (FO) y pérdidas de potencia pico (FP).

Los costos de inversión están asociados a la construcción de nuevas suplencias como se muestra en la ecuación (2).

Estos tramos de línea son propuestos de acuerdo a criterios particulares de cada empresa y a las posibilidades geográficas del sistema. De esta forma la metodología no solo determina que líneas intercambiar sino también las posibles líneas a construir o interruptores a instalar.

Los costos de operación representan las pérdidas de energía del sistema durante el periodo de planeamiento considerado. Adicionalmente, pueden ser considerados costos de potencia pico en el sistema (Aunque en su mayoría toman un valor de cero).

Las restricciones (5) y (6) representan las ecuaciones de flujo de carga el cual puede obedecer a un modelamiento trifásico o monofásico equivalente. Los límites de operación pueden ser establecidos mediante las ecuaciones (7) y (8). La ecuación (9) representa la restricción de radialidad del sistema resultante. λ_F es el número de caminos posibles entre cada uno de los nodos del sistema y el nodo fuente (slack) para la red resultante. Se puede observar en este modelo una alta no-linealidad además de una compleja representación de las soluciones ya que las variables de decisión corresponden a la topología del sistema.

El modelo es general ya que permite realizar la reconfiguración bajo el enfoque convencional de las pérdidas de potencia pico, solo basta introducir una curva de carga constante y hacer cero las constantes C_T y C_k . Igualmente, se puede optimizar bajo el enfoque puramente económico de los costos de inversión y operación haciendo cero la constante que corresponde a las pérdidas de potencia pico (C_p).

4. CURVA DE CARGA

Los diferentes usuarios conectados al sistema de distribución presentan una característica de consumo variable en el tiempo la cual es conocida y relativamente estable debido a la superposición de las cargas mismas.

Esta característica es representada mediante la curva de carga [4] la cual puede ser diaria, mensual o anual. El uso de la curva de carga permite que un problema puramente operativo como la reconfiguración o el balance de fases sea llevado a un horizonte de planeamiento.

Las cargas del sistema son de distinta naturaleza (residencial, comercial, industrial, etc), razón por la cual es aconsejable tener información detallada para cada tipo de usuario.

En los sistemas de distribución reales la falta de un adecuado seguimiento de la demanda desagregando el tipo de carga, hace necesario utilizar una única curva para cada alimentador o subestación; en este caso en particular puede ser utilizada la curva de duración de carga discretizada en T intervalos de tiempo. El valor más usual de T es de tres a cinco intervalos. La metodología propuesta permite tener en cuenta ambas posibilidades (con curva de carga individual o curva de duración de carga global); si se tiene información de la curva de carga por usuario los resultados son mucho más exactos.

5. MODELAMIENTO DE LA RED

El sistema de distribución puede ser modelado para una operación desbalanceada (modelo trifásico) o balanceada (modelo monofásico). El primero permite representar con mayor exactitud la operación del sistema aunque aumenta la complejidad matemática y requiere de mayor cantidad de datos. El segundo corresponde a una aproximación que permite encontrar resultados aceptables en sistemas con índice de desbalance reducido.

Tanto en el caso trifásico como en el monofásico fueron modelados los siguientes elementos

- Cargas
- Líneas (aéreas y subterráneas).
- Transformadores de distribución.
- Reguladores de tensión.
- Bancos de condensadores.
- Cogeneradores.
- Equivalente externo de la red de transmisión.

En el caso monofásico estos elementos son modelados de la forma convencional teniendo en cuenta la variación de la demanda con el nivel de tensión y la conmutación de los taps en los transformadores y reguladores de tensión.

Para el caso trifásico las cargas deben ser evaluadas para cada fase en las conexiones en estrella y entre fases para las conexiones en delta. Las cargas monofásicas pueden ser representadas como cargas trifásicas con datos de potencia cero en las fases no utilizadas.

Los datos de demanda son claves en la solución del problema de reconfiguración ya que de estos depende el estado real del sistema, por tal razón el éxito práctico de la metodología esta no solo en modelar con rigurosidad todos los elementos del sistema sino también en disponer de información detallada.

En el caso trifásico son consideradas las líneas tanto aéreas como subterráneas y las conexiones trifásicas (con y sin neutro) y monofásicas (fase-neutro y fase-fase) [5]. Las líneas aéreas corresponden a líneas cortas y no se tiene en cuenta el efecto capacitivo caso contrario ocurre con las líneas subterráneas.

Los reguladores de tensión y los transformadores de distribución fueron modelados para los casos trifásico y monofásico teniendo en cuenta la conexión y desfase angular.

El flujo de carga desarrollado corresponde al método de barrido iterativo de corrientes (tanto para el caso monofásico como trifásico). Esta metodología evita el uso de Jacobianos y obtiene soluciones en un tiempo de cálculo inferior al del método de Newton-Raphson.

6. METODOLOGÍA DE SIMULATED ANNEALING APLICADA AL PROBLEMA DE RECONFIGURACIÓN

Existen diversas metodologías para acercarse a la solución de problemas de tipo combinatorial [6], entre éstas se destacan los algoritmos evolutivos, el algoritmo

de búsqueda tabú, colonias de hormigas y la metodología de simulated annealing (SA) entre otros.

SA [7] corresponde a una variante de búsqueda local que permite movimientos ascendentes para evitar una convergencia prematura en un óptimo local. Su nombre proviene del proceso físico de templado de materiales (Annealing), este proceso consiste en la formación de estructuras cristalinas, de condiciones de resistencia mecánica superiores, durante un proceso de enfriamiento antecedido por una elevación de la temperatura.

El uso de la aleatoriedad permite al método escapar de óptimos locales mientras que las fases de enfriamiento hacen la búsqueda cada vez más localizada.

El algoritmo inicia con un parámetro T (temperatura) que mide la probabilidad de aceptación de soluciones de mala calidad. En general las soluciones de buena calidad son aceptadas y permiten el cambio de la incumbente. Las soluciones que no producen una mejora en la función objetivo son aceptadas con una probabilidad dada por la ecuación (10):

$$P_{(aceptar)} = e^{-\frac{f_i - f_j}{T}} \quad (10)$$

donde f_i representa la función objetivo para el estado de operación i mientras f_j representa la función objetivo para el estado de operación siguiente j . La transición entre el estado i y el estado j se realiza mediante un criterio de vecindad que será definido más adelante. La función objetivo es evaluada mediante un flujo de carga radial.

El valor de T disminuye para aceptar soluciones que produzcan cada vez un menor aumento de la función objetivo. A este proceso se le conoce como programa de enfriamiento y se puede efectuar por medio de una tasa de enfriamiento η así:

$$T_{k+1} = \eta \cdot T_k \quad (11)$$

En general η es un número real comprendido en el intervalo $[0,8 \sim 0,99]$.

Existe un valor determinado de vecinos a ser evaluados para cada valor de T , este valor es llamado número de tentativas N_k . Una regla empírica para determinar la variación de N_k es tener en cuenta que a medida que T disminuye debe hacerse una exploración más extensa.

$$N_{k+1} = \rho \cdot N_k \quad (12)$$

en donde $\rho > 1$

El algoritmo puede tener varias reglas de convergencia, una de las más utilizadas es determinar un número máximo de estados de temperatura para los cuales será procesado el algoritmo.

El criterio de vecindad se refiere a la regla heurística que determina la configuración siguiente en el proceso iterativo, en este sentido es importante definir un criterio que permita en lo posible encontrar soluciones factibles, en este caso corresponde a un intercambio de ramas

(*Branch Exchange Method*) el cual elige una suplencia a ser ubicada en el sistema de acuerdo a dos criterios:

- Criterio aleatorio.
- Índice de sensibilidad.

La elección entre el criterio a) o b) es determinada de forma estocástica de acuerdo a una probabilidad P_{in} definida a priori. Este parámetro (P_{in}) define el grado de determinismo del método.

Al conectar una suplencia en el sistema radial se forma una malla que debe ser abierta para conservar la radialidad, para esto se elige un ramo de esta malla que pasará a ser la nueva suplencia. La elección de esta rama es realizada nuevamente de acuerdo a los criterios a) o b). Este tipo de estrategia permite utilizar la potencialidad de la metodología combinatorial, con la capacidad de los índices de sensibilidad para encontrar rutas promisorias.

El índice de sensibilidad elegido para la entrada de una suplencia es el siguiente:

$$\xi = \frac{V_{ab}^2}{R_{ab}} \quad (13)$$

en donde:

ξ : índice de reducción de pérdidas al cerrar el enlace ab .

V_{ab} : voltaje en terminales del enlace ab antes de realizar el cambio.

R_{ab} : resistencia del tramo de línea ab .

Este índice puede mejorar el resultado en una búsqueda local pero en ningún momento garantiza optimalidad.

El índice para definir la rama de la malla a salir del sistema radial es la magnitud de la corriente por la rama misma.

La temperatura inicial es definida de acuerdo a la ecuación (14)

$$T_0 = \frac{D_{vi}}{\ln(P_{Ai})} \cdot f_0 \quad (14)$$

en donde:

D_{vi} : desviación inicial permitida de la función objetivo.

P_{Ai} : probabilidad de aceptación inicial.

f_0 : función objetivo del sistema base.

T_0 : temperatura inicial.

El algoritmo completo se muestra a continuación

Datos Requeridos: D_{vi} , P_{Ai} , N_0 , η , ρ , MaxN

Sistema Referencia

**** Temperatura inicial ****

$T_0 \leftarrow D_{vi} \cdot f_0 / \ln(P_{Ai})$

$N \leftarrow N_0$

for E = 1 **to** MaxN **do**

for K = 1 **to** N **do**

```

// **** Seleccion de la suplencia a ser adicionada ****//
if Random < Pin then
    Enlace ← CriterioDeterministico (b)
else
    Enlace ← CriterioEstocastico (a)
end if
    Ciclo ← (DeterminarCiclo(Enlace)
//**** Seleccion de la rama a ser retirada ****//
if Random < Pin then
    Rama ← CriterioDeterministico(Ciclo)
else
    Rama ← CriterioEstocastico(Ciclo)
end if
    Sistema ← NuevoSistema(Rama,Enlace)
    FO ← FuncionObjetivo(Sistema, Paramteros)
//**** Criterio de aceptación del SA ****//
if Incumbente < FO then
    Almacenar Incumbente
else

$$P_A \leftarrow \exp\left(\frac{f_i - f_j}{T}\right)$$

if Random < P_A then
        Aceptar
else
        No Aceptar
end if
end if
end for
//**** Disminución de la temperatura ****//

$$T \leftarrow \eta \cdot T$$

//**** Aumento de la cadena ****//

$$N \leftarrow \rho \cdot N$$

end for
Resultado : Sistema, Incumbente
    
```

7. RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó el sistema de prueba IEEE presentado en [8], este sistema presenta un alto índice de desbalance con cargas tanto trifásicas como monofásicas. El sistema cuenta con líneas subterráneas, un transformador trifásico y un regulador de tensión. La reconfiguración considera solo ramales trifásicos aunque los ramales monofásicos son tenidos en cuenta en el modelamiento del sistema. Las posibles suplencias se muestran punteadas en la figura 1 y corresponden a una configuración 722 de 0,1km y un costo de 1'915 [\$/m].

Se desarrolló un programa de computador bajo entorno Windows utilizando Delphi 7® como lenguaje de programación. Los datos son almacenados mediante una base de datos paradox y las metodologías numéricas (manejo de números complejos, flujo de carga, modelamiento de los elementos, metodología combinatorial, etc) fueron elaboradas utilizando librerías de enlace dinámico (dll) independientes.

Los parámetros de optimización utilizados son: $P_{in} = 60\%$, $D_{vi} = 20\%$, $P_{Ai} = 30\%$, $N_o = 500$, $\eta = 0,8$, $\rho = 1,1$, $MaxN = 10$.

El tiempo de cálculo promedio es de 30 segundos.

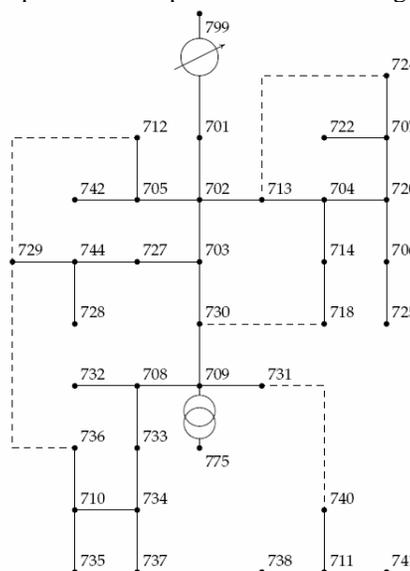


Figura 1. Sistema de prueba.

El sistema presenta unas pérdidas de potencia trifásica de 33,29 [kW] y 29,63 [kW] para el equivalente monofásico.

Duración [h]	1000	3000	4760
Valor [%]	100	60	30

Tabla 5. Curva de duración de carga.

Se ejecutó el programa de reconfiguración para varias condiciones de operación a saber:

- Sistema totalmente equilibrado (aproximación a un modelo monofásico equivalente).
- Sistema trifásico desbalanceado bajo reconfiguración.
- Sistema trifásico desbalanceado bajo un esquema coordinado balance de fases-reconfiguración.

Los resultados son mostrados en la tabla:

Sistema	Pérdidas
Sistema base modelamiento trifásico	33,24
Sistema base modelamiento monofásico	29,63
Sistema trifásico aplicando reconfiguración	25,80
Sistema monofásico equivalente aplicando reconfiguración	22,75
Sistema trifásico aplicando balance de fases	30,24
Sistema trifásico aplicando balance de fases y reconfiguración	23,84

Las pérdidas en los casos monofásico equivalente corresponden a una aproximación del comportamiento real del sistema. El sistema bajo condiciones balanceadas puede llegar a tener unas pérdidas de 22,75, no obstante, este nivel de pérdidas no puede ser alcanzado en la práctica pues el sistema no puede ser operado en forma totalmente equilibrada.

La aplicación de la metodología de reconfiguración de forma aislada puede llegar solo a un nivel de pérdidas de 25,80 y de 23,84 para la aplicación coordinada de balance de fases y la reconfiguración.

En cuanto a las configuraciones obtenidas éstas presentan grandes diferencias como se muestra en la tabla 2.

Sistema	Configuración
Reconfiguración monofásica	705 712
	707 724
	708 733
	714 718
	734 737
Reconfiguración trifásica	710 736
	704 713
	708 733
	727 744
	702 703
Reconfiguración trifásica + balance de fases.	704 713
	703 730
	731 740
	703 727
	710 736

Tabla 2. Resultado de la reconfiguración.

Los resultados muestran una clara diferencia entre el modelamiento trifásico y el modelamiento monofásico coincidiendo solo una suplencia (708-733). Esto muestra la importancia de un adecuado modelamiento del sistema. El sistema trifásico puede obtener una mayor reducción en las pérdidas si se ejecuta un programa de balance de fases antes de implementar la reconfiguración.

El balance de fases modifica las fases de conexión de las diferentes cargas de tal forma que se disminuyan las pérdidas del sistema. Desde luego, el sistema resultante no está totalmente equilibrado, pero presenta un mayor nivel de balance que el sistema base. El balance de fases se realizó utilizando una metodología de colonia de hormigas [3], los cambios de fase a realizar se muestran en la tabla 3.

Cambio	Nodos
ACB	713-730-741
CAB	714-724-727-728-732-733-738-740-744
CBA	718-734-737
BCA	720-736
BAC	722-731-742

Tabla 3. Cambios del balance de fases.

Al aplicar los cambios efectuados por el algoritmo de balance de fases el sistema pasa a tener un valor de pérdidas de 30,24[MW] lo que significa una disminución del 10%.

En términos de energía las pérdidas pasan de 76'021 kWh a 48'066 kWh.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos al grupo de investigación en sistemas eléctricos de la Universidad Tecnológica de Pereira por su apoyo constante a lo largo de esta investigación.

10. CONCLUSIONES

El modelamiento del sistema en condiciones desbalanceadas repercute en los resultados de la reconfiguración de alimentadores primarios presentando un mayor acercamiento a la operación real del sistema.

El balance de fases es una medida correctiva de bajo costo y con gran influencia en las pérdidas.

La reconfiguración de alimentadores primarios es planteada en un horizonte de planeamiento modelando la variación de la demanda por medio de la curva de carga. Este tipo de modelamiento tiene en cuenta los costos de operación e inversión para sistemas no automatizados en donde la reconfiguración se realiza por periodos de tiempo.

El uso combinado de la reconfiguración con otras metodologías de reducción de pérdidas tales como el balance de fases permite encontrar soluciones mucho más eficientes y económicas.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Yin S. Civalar, J.J Grainger and S.S H. Lee. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Trans. Power Delivery* 3(3): 1217-1223. Jul 1988.
- [2] V Glamocanin and Filipovic V. Optimal loss reduction of distribution networks. *IEEE Trans. Power Systems*. 5(3): 774-782, Agos. 1990.
- [3] GARCÉS R. Alejandro., GRANADA, Mauricio., GALLEGO, Ramón A. "Balance de fases en sistemas de distribución." *Revista Ingeniería y competitividad*. Cali 2005. ISSN 0123-3033
- [4] Robert. Et al. Time varying load análisis to reduce distribution losses through reconfiguration. *IEEE Trans. Power Delivery*. 8(1): 294-300 Enero 1993.
- [5] GARCÉS R, Alejandro. GRANADA, Mauricio. GALLEGO R., Ramón A. "Flujo de Carga Trifásico para Sistemas Radiales de Distribución". *Revista Ciencia Et Technica*. Año X N° 24. Mayo de 2004. UTP.
- [6] Gary A Kochenberger, Fred Glover. "Handbook of metaheuristics" *Kluwer academic publishers*. 2003.
- [7] CD Kirkpatrick, S Gellat and Vecchi MP. "Optimization by simulated annealing". *Science Magazing*. pp220. 1983
- [8] <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [9] Garcés Alejandro. "Reconfiguración de alimentadores primarios usando una metodología combinatorial bajo un modelamiento trifásico". *Tesis de maestría*. UTP. 2005.