

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON UN MODELAMIENTO TRIFÁSICO

RESUMEN

La metodología aquí planteada realiza una propuesta de ubicación óptima de reguladores trifásicos de tensión y el valor del tap correspondiente para cada equipo instalado, con el objetivo de minimizar los costos totales de inversión y operación del sistema. Debido a la complejidad matemática del problema, se utiliza la técnica de optimización combinatorial Simulated Annealing para encontrar una configuración de excelente calidad. Se emplea un flujo de carga radial trifásico para evaluar las pérdidas del sistema, el cual aprovecha las características de los sistemas de distribución, considerando el desbalance propio del sistema.

PALABRAS CLAVES: Reguladores de Tensión, Perfil de tensión, Reducción de Pérdidas, Simulated Annealing, optimización combinatorial, Flujo de carga trifásico.

ABSTRACT

This paper develops a methodology that make a proposal about the allocation of voltage regulators, in addition to the tap position for the devices, with the goal of minimize the total cost of inversion and operation of the system. Combinatorial optimization technique Simulated Annealing is used to find an excellent quality configuration. A three-phase power flow that takes advantage of the distribution systems characteristics is also used.

KEYWORDS: voltage regulators, losses reductions, Simulated Annealing, combinatorial optimization, three-phase power flow.

1. INTRODUCCIÓN

Un alto porcentaje de las pérdidas en el sistema de energía eléctrica se presentan en la parte de distribución, además de lo anterior, generalmente las empresas no disponen de un sistema de control remoto que les permita realizar un seguimiento y control de las variables en tiempo real, principalmente por los altos costos de inversión que estos sistemas automáticos requieren. En consecuencia, los sistemas de distribución son los menos automatizados y los que mayores dificultades presentan en la operación.

Una posible alternativa para mejorar los problemas de bajo o alto voltaje en la red y con ello procurar por una reducción de pérdidas en el sistema, es considerar la ubicación estratégica de reguladores de tensión a lo largo de los alimentadores de la red de distribución.

En la literatura especializada, se ha abordado el tema de la ubicación de reguladores de tensión, solo con el objetivo de mejorar el perfil de tensión como en [6], [7]. En este trabajo se propone una metodología para la ubicación de reguladores de tensión, que permite mejorar el perfil de tensión y reducir pérdidas técnicas en un sistema de distribución, teniendo en cuenta los costos de inversión y los costos de operación.

JOHN FREDY FRANCO B.

Ingeniero Electricista,
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
jffb@utp.edu.co

RAMÓN A. GALLEGO R.

Ingeniero Electricista,
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
ragr@utp.edu.co

DARIO E. RODAS RENDÓN.

Ingeniero Electricista,
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
drodas@utp.edu.co

Grupo de planeamiento en sistemas eléctricos

Inicialmente se describe el modelo matemático del regulador trifásico y se describe el modelo matemático correspondiente a la ubicación en un sistema de distribución. Seguidamente se describe la metodología para la solución del problema de optimización y por último se presentan los resultados de haber aplicado la metodología a un caso de prueba.

2. REGULADORES DE TENSIÓN EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Un regulador de tensión es básicamente un autotransformador con taps en uno de sus devanados, que permite variar el voltaje entregado, y que puede ser operado bajo carga. El dispositivo común es un regulador monofásico, el cual se puede aplicar a sistemas monofásicos o puede ser conectado junto con otras unidades para formar un banco trifásico. La metodología desarrollada considera para la instalación de reguladores de tensión, tanto unidades monofásicas como bancos trifásicos con conexión en estrella. El problema de la ubicación de reguladores de tensión, corresponde principalmente, a la determinación del lugar (localización), del número mínimo de reguladores de tensión en el alimentador y de la posición óptima del tap (para cada una de las fases sobre las que esté operando el equipo), de forma que el perfil de tensión esté dentro de unos límites preestablecidos y se reduzcan las pérdidas

del sistema de distribución para ciertas condiciones de carga. Obviamente, la solución será interesante si se obtiene una adecuada relación costo/beneficio.

Modelo Regulador Conexión estrella aterrizada:

A continuación se representa el esquema de conexión estrella aterrizada de los Reguladores de Tensión:

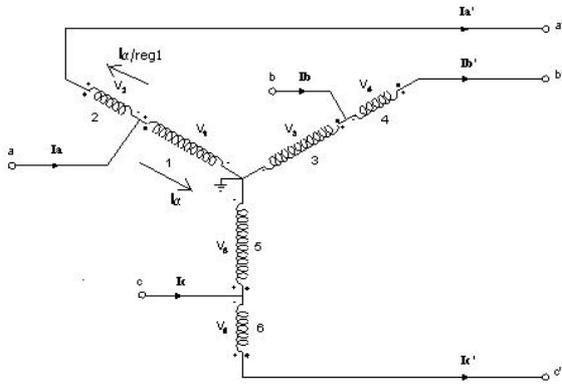


Figura 1. Conexión estrella aterrizada para el regulador.

Con las ecuaciones (1), (2) y (3), se pueden encontrar las tensiones de fase a la salida del regulador de tensión.

$$V_{a'n} = V_{an} \cdot \text{Tap1} \quad (1)$$

$$V_{b'n} = V_{bn} \cdot \text{Tap2} \quad (2)$$

$$V_{c'n} = V_{cn} \cdot \text{Tap3} \quad (3)$$

donde: V_{an} , V_{bn} y V_{cn} son los voltajes de entrada al regulador de tensión.

Para determinar las corrientes de entrada de los reguladores de tensión se usan las siguientes ecuaciones:

$$I_a = I_{a'} \cdot \text{Tap1} \quad (4)$$

$$I_b = I_{b'} \cdot \text{Tap2} \quad (5)$$

$$I_c = I_{c'} \cdot \text{Tap3} \quad (6)$$

3. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1. Función objetivo

El objetivo es minimizar el valor de una función que representa los costos totales y que involucra: el costo de las pérdidas de energía del sistema, el costo de inversión por colocación de los reguladores de tensión, y una componente que indica en unidades monetarias el beneficio asociado al mejoramiento del perfil de tensión del sistema de distribución. La discriminación de cada uno de las componentes del costo total es la siguiente:

- Costo de Inversión: Este costo toma en cuenta todos aquellos gastos en los que se incurre por instalar los reguladores de tensión necesarios para el cumplimiento de los objetivos, entre ellos se encuentra: costo del regulador de tensión instalado,

costo de la mano de obra requerida para la instalación, equipos complementarios para el buen funcionamiento de los reguladores de tensión (transformadores de potencial y transformadores de corriente), costo en el que se incurre por interrupción del servicio debido a la instalación del equipo.

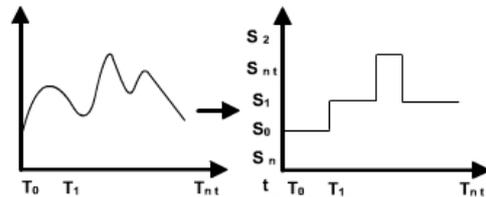


Figura 2. Discretización de la curva de carga.

- Costo de Pérdidas de Energía en el Sistema: Para el cálculo de las pérdidas de energía del sistema, se considerarán variaciones de carga del sistema durante un tiempo determinado T (con $T=8760$ horas anuales). Las variaciones de carga se aproximan por medio de niveles discretos (figura 2). Cada nivel S representa un porcentaje del nivel de carga máxima.

3.2. Restricciones

Restricciones del sistema:

- Balance de potencia nodal.
- Límites mínimos y máximos de tensión.

Restricciones técnicas:

- Cantidad de reguladores de tensión a ubicar en el sistema.
- Capacidad de carga del regulador de tensión.
- Valor del tap del regulador de tensión.

3.3. Modelo matemático

Los conceptos anteriormente enunciados se reúnen en el modelo que se presenta a continuación para sistemas trifásicos.

$$\min C_E \sum_{t=1}^{N_t} T_t \cdot P_t(V_{kjt}, \Theta_{kjt}) + C_L \cdot P_L + \alpha \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^3 \delta \cdot \Delta V_{kjt} + \sum_{k=1}^N C_{RTPk} \cdot VR_k \quad (7)$$

sa

$$V_{kmin} \leq V_{kjt} \leq V_{kmax} \quad (8)$$

$$P_{D(kjt)} = f_P(V_{kjt}, Q_{kjt}) \quad (9)$$

$$Q_{D(kjt)} = f_Q(V_{kjt}, Q_{kjt}) \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^N VR_k \leq RT_{disp} \quad (11)$$

$$-16 \leq TAPRT_{kjt} \leq 16 \quad (12)$$

con $TAPRT_{kjt}$ entero

$$CAPVR_k \leq CAP_{maxdisp} \quad (13)$$

donde:

C_{RTPk} : Costo anualizado de instalación del regulador de tensión de capacidad P en la barra k.

VR_k : Variable binaria. $VR_k = 1$ Si existe un regulador de tensión instalado en la barra k, 0 Caso contrario.

V_{ref} : El voltaje de referencia es el voltaje deseado en el sistema. Este es un dato de entrada para la ubicación de reguladores, cuando no se suministra, éste es calculado como un promedio entre V_{kmin} y V_{kmax} .

$V_{k\phi t}$: Desviación de la magnitud de voltaje en la fase ϕ de la barra k durante el período t, con respecto al Vref.

α : Factor de penalización de la desviación de voltaje en \$/V. Se ajusta de tal manera que sea comparable con la componente de costo de la energía.

δ : Factor de penalización de las desviaciones de tensión. $\delta < 1$ Si $V_{k\phi t} \in [V_{kmin}, V_{kmax}]$, delta es ≥ 1 en caso contrario.

$TAPRT_{k\phi t}$: Tap del regulador de tensión en la fase ϕ de la barra k para el período t. Comercialmente el tap viene para variar entre 1 y 16 posiciones.

$CAPV R_k$: Capacidad nominal en kVA del regulador de tensión instalado en la barra k. El modelo matemático que representa el problema de la ubicación de reguladores de tensión (ecuaciones 7 a 13), se puede utilizar para un punto de la curva de carga o para un horizonte de planeamiento de largo plazo.

4. MÉTODO DE SOLUCIÓN

En este trabajo se utilizó el método de Simulated Annealing para encontrar la configuración óptima de la localización de reguladores de tensión en el sistema de distribución. En [1] se presenta una metodología que utiliza algoritmos genéticos.

En el caso de los problemas combinatoriales el proceso de calentamiento es análogo a una búsqueda aleatoria basada en un criterio de vecindad. Esto porque a altas temperaturas, el movimiento de las partículas del material esta acompañado de una alta energía cinética y de movimientos totalmente impredecibles. El subsiguiente proceso, de enfriamiento, es emulado por fases más determinísticas que aceptan soluciones con una calidad cada vez mejor. El óptimo o las soluciones subóptimas con buen valor en la función objetivo, son encontradas al final del proceso y su calidad depende de la velocidad de enfriamiento.

El algoritmo inicia con un parámetro T (temperatura) que mide la probabilidad de aceptación de soluciones de mala calidad. En general las alternativas de buena calidad (soluciones que mejoran la función objetivo) son aceptadas y permiten el cambio de la mejor solución encontrada hasta el momento (incumbente). Las soluciones que no producen una mejora en la función objetivo son aceptadas con una probabilidad dada por la ecuación (14), con ello se busca guiar al algoritmo hasta encontrar una solución lo más cercana posible a la óptima

(óptimos locales), evitando posibles embotellamientos en falsos óptimos.

$$P(A) = e^{-\frac{f(i) - f(j)}{T}} \quad (14)$$

donde,

$P(A)$: Probabilidad de aceptación del estado o la configuración j.

$f(i)$: función objetivo para el estado de operación o configuración i.

$f(j)$: función objetivo para el estado de operación o configuración siguiente j.

El valor de T disminuye para aceptar soluciones que produzcan cada vez un menor desmejoramiento de la función objetivo (la posibilidad de aceptar soluciones de mala calidad es cada vez más pequeña).

Al inicio del proceso se determina el valor de la temperatura. Una temperatura inicial muy alta, significa que el algoritmo aceptará configuraciones de muy pobre calidad en las etapas iniciales. Esto implica un mayor esfuerzo computacional. De otro lado, una temperatura inicial muy baja puede hacer que el algoritmo converja rápidamente en óptimos locales. Al parámetro de temperatura inicial, se le debe adicionar un parámetro que indique que tan rápido debe descender la temperatura y otro que especifica cuantas configuraciones tentativas se deben probar en cada nivel de temperatura (longitud de la cadena). En [3] se describen las estrategias para la seleccionar los valores de estos parámetros.

Para permitir que el método de optimización (Simulated Annealing) explore diferentes alternativas es necesario definir una estructura de vecindad, que permita crear una nueva configuración a partir de pequeños cambios a la configuración actual. El proceso de vecindad es aleatorio, pero es posible darle mayor prioridad a aquellas configuraciones que sean identificadas como atractivas para obtener un mejoramiento de la función objetivo, utilizando un índice de sensibilidad.

En términos de programación, el número de transiciones de un estado i a un estado j y el proceso de enfriamiento (disminución de la temperatura) representan el esfuerzo computacional que se está dispuesto a tener durante la fase de optimización. Estos parámetros dependen del comportamiento de la búsqueda y deben ser sometidos a un proceso de calibración.

5. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA LA UBICACIÓN DE REGULADORES DE TENSIÓN

La ubicación de reguladores de tensión requiere determinar la(s) barra(s) y la posición del tap para cada fase y en cada nivel de demanda de las unidades reguladoras de tensión. Una configuración para este problema se describe en la tabla 1, allí se indica que la

barra 18 tiene ubicado un regulador de tensión para el cual el tap de la fase B se encuentra en 0.9 p.u (-16) para el nivel 2 de la curva de demanda. Donde el tap varía entre 0.9 y 1.1 p.u para una unidad con capacidad de regulación del 10 %.

Barra	18	...	25
Nivel 1	(+4 (+)16 (+)4	...	(+8 (+)4 (+)8
Nivel 2	(+16 (-)16 (+)4	...	(-8 (+)8 (+)8
...
...
...
Nivel Nt	(+4 (-)4 (+)4	...	(+4 (+)4 (+)16

Tabla 1. Codificación en la ubicación de reguladores.

En el proceso de optimización, solamente se considera la primera fila de la tabla 1, es decir, el algoritmo sólo se preocupa por ubicar los reguladores en determinadas barras del sistema. Puesto que en cada barra solamente se puede instalar un regulador, es posible utilizar una representación binaria mediante el vector VR_k como se describió en la sección 3.3 (Modelo matemático). Las demás variables del proceso (tap de cada fase) son optimizadas de manera controlada. También debe tenerse en cuenta que cuando se ubica un regulador en determinada barra del sistema, este debe ajustarse a una capacidad comercial disponible.

La selección de una barra para la ubicación de un regulador de tensión se realiza clasificando previamente todos los nodos de tensión primaria del sistema de acuerdo a cinco criterios:

- Barras entre 1 p.u y $(V_{ref} - 0.02)$.
- Barras entre $(V_{ref} - 0.02)$ y V_{min} .
- Barras con voltajes menores a V_{min} .
- Barras con voltajes mayores a V_{max} .
- Barras entre el voltaje de referencia V_{ref} y V_{max} .

Una misma barra puede entrar en la misma o en diferentes clasificaciones dependiendo de las magnitudes de los voltajes que dicho nodo presente para cada fase.

Para efectos de la solución del problema, se implementó una aplicación que proporciona el nodo y la posición del tap (de cada una de las fases sobre las que opera el regulador de tensión) de cada regulador instalado para cada período de la curva de discretización, con el objetivo de minimizar el costo de las pérdidas de energía durante el período analizado junto con el costo de inversión. Así, mismo, se busca una mejora considerable en el perfil de tensiones del sistema.

Para la ejecución de la aplicación se requiere la información de la red existente, topología, impedancias de las líneas, longitud de las líneas y las capacidades nominales de los reguladores a instalar, con sus parámetros de impedancia, costo de inversión, vida útil y

tasa de retorno (información necesaria para el cálculo del costo de inversión anualizado). La aplicación se desarrolló para la ubicación de reguladores de tensión en sistemas de distribución desbalanceados, lo cual exige la utilización de modelos trifásicos para cada uno de los componentes que hacen parte del sistema (líneas de distribución, transformadores de distribución, reguladores de tensión - conexión trifásica en estrella-, condensadores, cargas, entre otros). Estos modelos deben ser adecuados a un flujo de carga trifásico, el cual determina las condiciones de operación del sistema de distribución (Pérdidas de energía y perfiles de tensión de la red), en [5] se puede encontrar una descripción del modelamiento trifásico de los componentes de un sistema de distribución y del método de flujo de carga trifásico utilizado en este trabajo.

En la figura 3 se muestra un diagrama de flujo aplicación desarrollada.

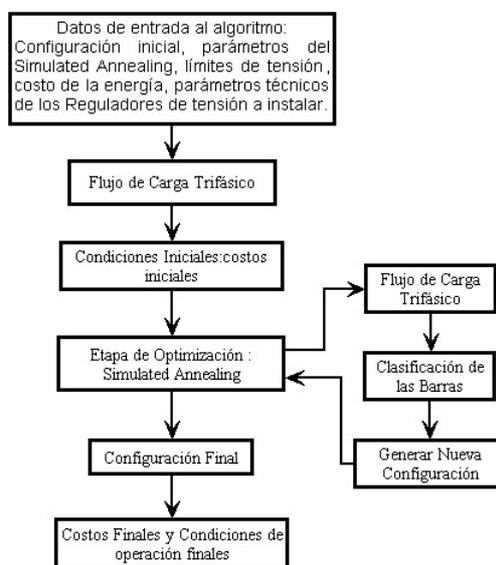


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

La ubicación de reguladores para sistemas trifásicos fue implementada en Borland Delphi 7.0, a través de una librería de enlace dinámico que interactúa con un flujo de carga trifásico desarrollado en el Grupo de Planeamiento en Sistemas Eléctricos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras aplicar la metodología desarrollada al sistema de distribución de prueba IEEE de 33 nodos. Los parámetros de la red se pueden encontrar en [4]. Para realizar esta prueba se utilizaron los parámetros que aparecen en la tabla 2.

Costo de la energía	100 \$/kWh
Costo de la potencia pico	0 \$/kW
Límite de tensión mínimo	0.95 p.u.
Límite de tensión máximo	1.05 p.u.
Voltaje deseado a la salida del regulador	1.05 p.u.
Voltaje deseado en el sistema	1.00 p.u.
Costo de la energía	100 \$/kWh

Tabla 2. Parámetros usados en las pruebas.

Niveles de temperatura	10
Factor de disminución de la temperatura	0.99
Factor cadena inicial	1
Factor aumento de la cadena	1.1
Probabilidad de aceptación inicial	40%

Tabla 3. Parámetros del Simulated Annealing.

En la figura 4 se muestra la curva de duración de carga anual discretizada con la que se representó el comportamiento de las cargas para el sistema de prueba durante un año. Los datos de los reguladores utilizados en este sistema se encuentran en la tabla 4:

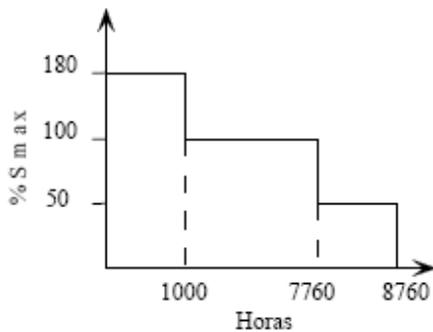


Figura 4. Curva de carga anual discretizada.

Tensión Nom (V)	Potencia Nom (kVA)	R(p.u.)	X(p.u.)	Costo del Regulador de Tensión (\$)
13800	72	0	0.0005	2537771
13800	144	0	0.0005	4441100
13800	288	0	0.0005	6090651
13800	333	0	0.001	8120869
13800	416	0	0.001	9516643
13800	432	0	0.001	9516643
13800	500	0	0.001	9897309
13800	576	0	0.001	10785529
13800	667	0	0.001	11039306
13800	720	0	0.001	11419972
13800	833	0	0.001	12054414

Tabla 4. Conjunto de reguladores.

En la tabla 5 se presentan los resultados de la ubicación de reguladores, en ella se muestra la cantidad de equipos instalados, su capacidad nominal y la posición del tap para cada fase en cada período de la curva discretizada de demanda.

Nodo	Cap. Nom. (kVA)	Valor TapA	Valor TapB	Valor TapC	Nivel
Nodo 2	416	16	15	15	1
		12	11	11	2

		10	9	9	3
Nodo 5	288	16	16	16	1
		8	7	8	2
		4	4	4	3
Nodo 28	144	12	10	9	1
		6	6	5	2
		2	3	2	3

Tabla 5. Ubicación de reguladores de tensión.

A continuación, en las figuras 5, 6, 7, se ilustran los perfiles de tensión iniciales y finales de la fase A (después de la ubicación de los equipos en el sistema), para el período de carga máxima (figura 5), para el período de carga media (figura 6) y para el período de carga mínima (figura 7). Las curvas de líneas a trazos corresponden a los perfiles de tensión iniciales.

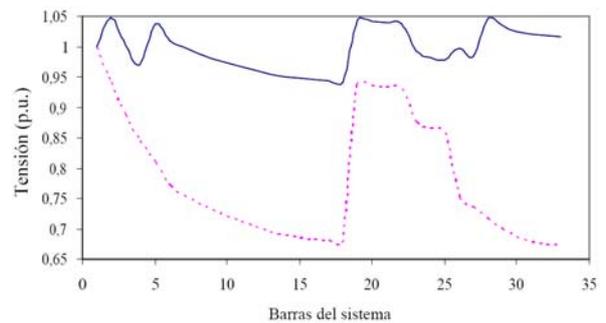


Figura 5. Perfil de tensión para la fase A en el período de carga máximo.

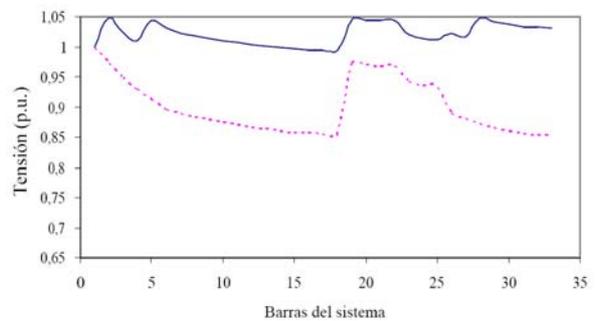


Figura 6. Perfil de tensión para la fase B en el período de carga medio.

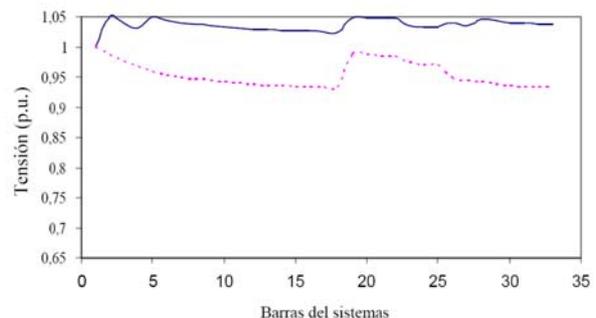


Figura 7. Perfil de tensión para la fase C en el período de carga mínimo.

Al observar las gráficas para los perfiles de tensión se puede notar que tras la ubicación de los reguladores, las tensiones en las barras mejoran notablemente, corrigiendo en la totalidad de ellas los problemas que existían inicialmente de violación de los límites de tensión.

En cuanto al comportamiento de las pérdidas de energía en el sistema, en la tabla 6 se muestra el estado de ellas antes y después de la ubicación de los reguladores de tensión, notándose una reducción importante de dichas pérdidas tras la ubicación de los equipos.

Periodo de la curva de carga	Pérdidas de potencia (kW)	Pérdidas de energía (kWh)
Pérdidas iniciales (sin reguladores de tensión)	Pérdidas iniciales (sin reguladores de tensión)	Pérdidas iniciales (sin reguladores de tensión)
1	1787,2	1787212
2	401,8	2716429
3	88,1	88087
Pérdidas finales (con reguladores de tensión)		
1	1202,2	1202184
2	331,8	2242796
3	77,6	77553

Tabla 6. Pérdidas del sistema de distribución.

Con la solución planteada, se alcanzó una reducción en las pérdidas de energía del 33 %, 17 % y 11 %, para el período de carga máxima, media y mínima, respectivamente, disminuyendo los costos de operación de manera considerable, lo cual permite la inversión en los reguladores de tensión.

7. CONCLUSIONES

El modelo matemático planteado para la ubicación de reguladores de tensión en los sistemas de distribución de energía eléctrica recoge aspectos de gran importancia para las empresas de distribución de energía eléctrica como son los costos de inversión, costos de operación representado por las pérdidas de energía y además una componente que representa el costo de tener perfiles de tensión deficientes en la red de distribución.

Se utilizó el método combinatorial Simulated Annealing, encontrando soluciones de muy alta calidad, las cuales satisfacen los requerimientos planteados: reducción de pérdidas como el de mejoramiento del perfil de tensión.

La metodología descrita para la ubicación de reguladores, lleva el tap del regulador a la máxima posición posible, sin violar los límites de tensión. Desde este punto de vista, la ubicación del tap es un proceso controlado que permite explorar el espacio de soluciones en una dirección que garantiza propuestas de buena calidad,

siempre y cuando el modelo de la carga sea de potencia constante. En el caso en que se consideran diferentes modelos de carga, el espacio de soluciones es mayor, por lo que el posicionamiento del tap debe ser modelado con el fin de que pueda tomar las diferentes posiciones.

La metodología de ubicación de reguladores, puede ser integrada con otra metodología de ubicación de condensadores a través de una única configuración que permita realizar una búsqueda simultánea con ambas propuestas (posición y cantidad de reactivos inyectados junto con la posición y ubicación del tap de los reguladores). En la combinación resultante de las dos metodologías, a cada una de ellas se le asignaría un objetivo específico, los condensadores se ubicarían con el fin de reducir pérdidas y los reguladores de tensión tendrían como propósito el mejoramiento de los perfiles de tensión. Dado lo anterior, el espacio de soluciones del problema conjunto es mucho mayor que el espacio de soluciones de cada problema individual. Por lo tanto se hace necesario emplear técnicas eficientes que permitan conseguir soluciones de mejor calidad que las obtenidas con cada metodología actuando de forma independiente.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SOUZA B., Almeida A., Alves H., Cavalcanti C. Localizacao e Ajustes Ótimos de Bancos de Reguladores Automáticos em Redes de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos. Part III: The Numerical Results, IEEE Trans. on PAS, vol. 104, no. 11, pp. 3278-3283, Noviembre 1985.
- [2] AARTS E., Korst J. Simulated Annealing and Boltzman Machines. John Wiley and Sons, 1989.
- [3] GALLEGO Ramón, ESCOBAR Antonio, ROMERO Rubén. Métodos de optimización combinatoriales, texto Maestría en Ingeniería Eléctrica, 2004.
- [4] VENKATESH B., RAKESH Ranjan, Gooi H. B. Optimal Reconfigurations of Radial Distribution System to Maximize Loadability. IEEE Transactions on Power Systems. Vol 19. No. 1, February 2004.
- [5] GARCÉS A. Reconfiguración de Alimentadores Primarios Usando una Metodología Combinatorial Bajo un Modelamiento Trifásico. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colombia.
- [6] GRAINGER J.J. and Cinvalar S. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and voltaje Regulators, Part I: The Overall Problem. IEEE Trans. on PAS, vol. 104, no. 11, pp. 3278-3283, Noviembre 1985.
- [7] GRAINGER J.J. and Cinvalar S. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and voltaje Regulators, Part II: The Solution Method, IEEE Trans. on PAS, vol. 104, no. 11, pp. 3278-3283, Noviembre 1985.
- [8] KERSTING, W. Distribution System Modeling and Analysis. CRC Press LLC. New York, 2000.