

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO USANDO COLONIA DE HORMIGAS PARA UBICAR CONDENSADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Multi-Objective Optimization Using Ants Colony for Placed Capacitors on Distribution Systems

RESUMEN

En este artículo se pretende cambiar el formato clásico de optimización del problema de ubicación y dimensionamiento de condensadores en sistemas de distribución y presentarlo desde la perspectiva multiobjetivo de una reducción de pérdidas contra el aumento de los costos de inversión. Se utiliza como algoritmo de búsqueda la metaheurística colonia de hormigas, adaptando sus mecanismos de exploración para ser guiados por el concepto de dominancia. El algoritmo es probado con un sistema de la literatura especializada, obteniendo resultados de muy alta calidad.

PALABRAS CLAVES: optimización multiobjetivo, dominancia, frente de pareto, planeamiento distribución, colonia hormigas, compensación reactivos.

ABSTRACT

This paper intends to change the location and sizing of capacitors optimization methodology with multi objective criteria. The first objective is the reduction of power losses, and the second is the investment cost. The ant colony optimization is used, adapting its exploration mechanism using the dominance concept. The algorithm is tested on one system from specialized literature, obtaining high quality results.

KEYWORDS: combinatorial, genetic, multi-objective, optimization, dominance, ant colony, reactive compensation.

1. INTRODUCCIÓN

La rentabilidad económica de una empresa se puede medir directamente con la eficiencia de sus instalaciones, ya que debe existir un aprovechamiento máximo de la materia prima para que las ganancias sean mayores. Para el sector eléctrico, un índice de eficiencia se manifiesta en la cantidad de pérdidas de potencia activa que se generen en sus redes de eléctricas. Por las características físicas del transporte de energía es imposible eliminarlas completamente, pero se estima que el nivel de pérdidas con respecto a la potencia servida no debe superar el 10% e idealmente deben estar entre el 3 y el 6%. Actualmente en el país las empresas distribuidoras presentan un índice de pérdidas de potencia en sus redes que oscila entre el 9% y el 35% [1]. Por esta razón se están diseñando propuestas que mejoren la eficiencia del sistema con inversiones de capital razonables para la empresa, entre las cuales se pueden mencionar:

- Transferencia de carga
- Balance de fases
- Ubicación de Condensadores
- Ubicación de reguladores de tensión
- Redimensionamiento de conductores

De entre este grupo se destaca la ubicación de condensadores, ya que es una alternativa económicamente

viable, de buenos resultados, y con el menor grado de perturbación en la continuidad del servicio.

Este problema ha sido tratado por diferentes autores en la literatura especializada. En Baran [2] la función objetivo incorpora los beneficios económicos de la reducción de pérdidas con la inversión de capital. Con este mismo enfoque se utilizan algoritmos genéticos en [3] y búsqueda Tabú en [4].

Una forma adecuada de resolver este problema es considerar dos funciones objetivo independientes y en conflicto. La primera relaciona la reducción de pérdidas y la segunda los costos de inversión necesarios en la compra de los equipos de compensación. Optimizar uno de ellos afecta negativamente el otro, y no existe una solución óptima que sea superior a cualquier otra con respecto a ambos objetivos.

Para resolver este tipo de problema se cuenta con la optimización multiobjetivo, donde existe una serie de algoritmos combinatoriales capaces de entregar un conjunto de soluciones con los mejores compromisos entre los objetivos. Kalyanmoy [5] presenta una detallada descripción de los algoritmos multiobjetivos más conocidos en la literatura.

CÉSAR AUGUSTO PEÑUELA MENESES

Ingeniero Electricista.
Estudiante de Maestría del programa de ingeniería eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
cpenuela@orbitel.net.co

MAURICIO GRANADA ECHEVERRI

Ingeniero Electricista.
Profesor asistente.
Programa de ingeniería eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
magra@utp.edu.co

RAMÓN ALFONSO GALLEGO RENDÓN

Ingeniero Electricista.
Profesor Titular
Programa de ingeniería eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
ragr@utp.edu.co

En [6] Mendoza, propone una metodología multiobjetivo para mejorar los perfiles de tensión en un sistema de distribución y reducir las pérdidas de potencia por medio de la instalación de reguladores de tensión.

En el presente artículo se describe un algoritmo híbrido entre la técnica multiobjetivo basada en la distancia al frente de Pareto (DPGA) presentada en [7], y la optimización por colonia de hormigas descrita en [8], para resolver el problema de reducción de pérdidas en sistemas de distribución por medio de la compensación de reactivos. La eficiencia del algoritmo se comprueba con un sistema de prueba de la literatura especializada.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El costo de las pérdidas de energía para el período de estudio se calcula con (1), donde ke (\$/KWh) es un parámetro que asigna un costo a las pérdidas de potencia P_i durante el intervalo de tiempo T_i , mientras que ko (\$/KW) penaliza la potencia servida en la hora pico P_1 . El parámetro nc mide el número de intervalos discretos en la curva de carga.

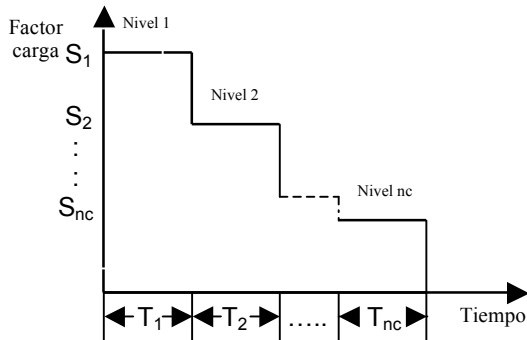


Figura 1. Curva de carga discretizada.

$$C_{\text{energía}} = ke \cdot \sum_{i=1}^{nc} T_i \cdot P_i + ko \cdot P_1 \quad (1)$$

El costo de inversión en los bancos de condensadores se expresa por medio de la ecuación (2), donde N_f es el número de unidades instaladas en cada barra f donde fue asignada la instalación de un banco, teniendo como límite máximo nb unidades por barra. El parámetro u es el número total de bancos instalados en la red de distribución y k_c es el costo por unidad instalada.

$$C_{\text{condensadores}} = k_c \sum_{f=1}^u N_f \quad (2)$$

La ecuación (3) muestra los límites de tensión para cada barra j del sistema de distribución durante el nivel de carga i .

$$V_j^i \min \leq V_j^i \leq V_j^i \max \quad (3)$$

La formulación matemática del problema se resume en (4), donde la ecuación de igualdad indica que se deben cumplir

las leyes circuitales (flujo de carga) para cada esquema de control.

$$v = \left[\min \left(ke \sum_{i=1}^{nc} T_i \cdot P_i + ko \cdot P_1 \right) \min \left(k_c \sum_{f=1}^u N_f \right) \right]$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a: } & G^i(x^i, u^i) = 0 \\ & V_j^i \min \leq V_j^i \leq V_j^i \max \\ & u \geq 0 \\ & 0 \leq N_f \leq nb \end{aligned} \quad (4)$$

3. ALGORITMO DE SOLUCIÓN

A. Sistema por Colonia de Hormigas

La optimización por colonia de hormigas [8] es una metaheurística diseñada para buscar soluciones de buena calidad a problemas donde las variables de decisión crean espacios complejos y extensos, haciendo inviable la aplicación de alguna técnica exacta [9].

El procedimiento de búsqueda simula computacionalmente el comportamiento de las hormigas naturales y los caminos trazados desde el nido hasta la fuente de alimento. Para ello se crea un espacio de memoria que almacena rastros de feromona artificial τ_i que caracterizan cada uno de los posibles caminos que lleven a la solución final. Los valores acumulados cambian en el tiempo con un $\Delta\tau$ que es proporcional al valor de la función objetivo, tal como muestra la ecuación (5)

$$\tau_i = \tau_i + \Delta\tau \quad (5)$$

Para la formación de una alternativa de solución se agrega iterativamente un elemento de entre un conjunto de alternativas N_i^k , los cuales poseen una probabilidad p_i de ser elegidos dada por:

$$p_i = \frac{\tau_i^\alpha \cdot \eta_i^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_l^\alpha \cdot \eta_l^\beta} \quad (6)$$

Donde τ_i es el elemento almacenado en la matriz de feromonas y define el grado de aceptación por parte de alternativas de solución anteriores en escoger el elemento i , y η_i es un valor dado por información heurística proveniente de un análisis de sensibilidad del sistema. Los parámetros de inicialización α y β definen el grado de importancia a la información utilizada. Si $\alpha > \beta$ se da prioridad a la información proveniente de la matriz de feromonas, y en caso contrario prima la información heurística. El procedimiento de selección se realiza por medio de una variable aleatoria q_0 , la cual es comparada con un parámetro q , ambos dentro del intervalo [0,1], tal como se muestra en la ecuación (7). En el primer caso la selección es determinística, tomando el elemento i con el mayor valor de feromona y aceptación heurística. En el segundo caso la selección es dada por un mecanismo J de tipo probabilístico o aleatorio, como por ejemplo la ruleta o un torneo [10].

$$i = \begin{cases} \max_{l \in N_i^k} \left\{ \tau_l^\alpha \cdot \eta_l^\beta \right\} & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (7)$$

Ya que el algoritmo se basa en la información recolectada en el tiempo por varios individuos, se requiere en cada iteración de la construcción de una población de búsqueda formada por varias alternativas de solución.

Con el fin de escapar de óptimos locales, el algoritmo genera un proceso de evaporación que elimina una leve porción de los cúmulos de feromona τ_i , tal como se muestra en la ecuación (8), donde ρ es un parámetro de afinamiento no mayor a 0.1

$$\tau_i = \tau_i \cdot (1 - \rho) \quad (8)$$

B. Algoritmo Basado en Distancia al Frente de Pareto

Existen métodos de optimización clásicos [5] que asocian a cada uno de los objetivos un factor de peso para luego ser agrupados en un solo objetivo, tal como se muestra en la ecuación (9).

$$v = \min[w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2] \quad (9)$$

Básicamente lo que se está generando con los factores de peso es un gradiente de búsqueda sobre el espacio de solución, tal como se ilustra en la figura 2.

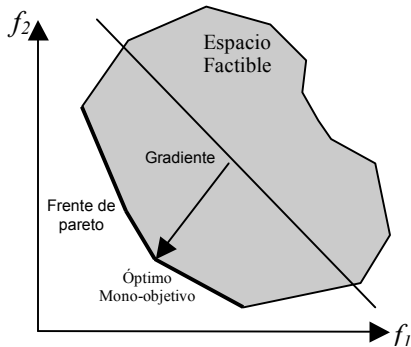


Figura 2. Método de suma de Pesos para problemas multiobjetivo

Como se aprecia el proceso encuentra una sólo solución y tiene una alta dependencia de los valores que se escojan para los factores de peso. Por tanto si se quiere encontrar más alternativas pertenecientes al frente de Pareto se debe realizar varias veces el mismo procedimiento cambiando en cada caso el gradiente de búsqueda.

En problemas multiobjetivo el criterio de optimalidad debe ser revaluado, ya que se pueden considerar simultáneamente funciones de minimizar y de maximizar. Además, el orden de magnitud de cada función puede ser diferente, haciendo inviable una comparación directa. Por tanto, los algoritmos multiobjetivo introducen el operador de *dominancia*, el cual define que una solución $x^{(1)}$ domina otra solución $x^{(2)}$ si se cumplen las siguientes condiciones:

- La solución $x^{(1)}$ no es de menor calidad que $x^{(2)}$ en todos los objetivos.
- La solución $x^{(1)}$ es estrictamente mejor que $x^{(2)}$ en al menos uno de los objetivos.

Aplicando iterativamente estas reglas sobre un conjunto cualquiera de soluciones de un problema de optimización multiobjetivo, se puede establecer cuales son las alternativas dominantes, conocidas como *Conjunto No Dominado*. Las soluciones restantes forman parte del Conjunto de *Soluciones Dominadas*. Si se logra establecer cuál es el conjunto de Soluciones Dominantes a través de todo el espacio objetivo, entonces se habla de *Frente de Pareto*. Procedimientos para obtener el frente dominante son descritos con detalle en [5].

El Algoritmo Basado en Distancia al Frente de Pareto (DPGA) es un algoritmo reportado en [7] (originalmente basado en algoritmos genéticos) para resolver problemas de optimización con múltiples objetivos en conflicto. El procedimiento requiere de la formación de dos tipos de poblaciones. La primera es una población estándar P , con un tamaño fijo de np alternativas de solución. La segunda población E se caracteriza por mantener las soluciones dominantes encontradas durante la búsqueda, por lo que el número de alternativas ne que almacena varía durante el proceso. Los operadores clásicos del genético (selección, cruce y mutación) actúan sólo en el conjunto P .

Una iteración del algoritmo inicia asignando la misma función de adaptación F a todas las soluciones del conjunto P . Luego se compara sistemáticamente cada miembro de P con cada una de las soluciones almacenadas en E , aplicando en cada paso la siguiente ecuación:

$$d_{ik}(x) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\frac{e_m^{(k)} - f_m^{(i)}}{e_m^{(k)}} \right)^2} \quad (10)$$

Donde:

$e_m^{(k)}$: valor de la función objetivo m para la k -ésima alternativa perteneciente al conjunto dominante actual (E).

$f_m^{(i)}$: valor de la función objetivo m para la alternativa de solución i perteneciente a la población actual (P).

Posteriormente la ecuación (11) determina la distancia más corta de la solución i al conjunto dominante:

$$d_i^{\min} = \min[d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ine}] \quad (11)$$

Si la solución i es *no dominada* con respecto a cada solución del frente dominante, ingresa al conjunto elitista E y mejora su función de adaptación de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F_i = F + d_i^{\min} \quad (12)$$

Adicionalmente, la alternativa i elimina las soluciones que *domine* del conjunto elitista, en cuyo caso también mejora la función de adaptación de las soluciones de P que aún no han sido comparadas, igualándolas al valor calculado con (12). En caso de que la alternativa i resulte dominada por al menos una alternativa de la población elitista, su función de adaptación se penaliza de acuerdo a la ecuación (13) y no se modifica el conjunto élite.

$$Fi = F - di^{\min} \quad (13)$$

La iteración del algoritmo culmina con la ejecución de los operadores de selección, cruzamiento y mutación.

4. ALGORITMO DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE UBICAR CONDENSADORES

A continuación se describe el algoritmo desarrollado para ubicar y dimensionar condensadores en sistemas de distribución trifásicos balanceados con base en la optimización por colonia de hormigas e incorporando modificaciones de feromona de acuerdo a la distancia al frente calculada en forma análoga al DPGA.

A. Análisis de Sensibilidad

Es un mecanismo de tipo heurístico el cual permite reducir el espacio de alternativas de solución, determinando una lista de los nodos que producen el mayor impacto en las pérdidas de potencia activa cuando les instalan bancos de condensadores. Una forma sencilla de encontrar los nodos más sensibles es utilizada en [11], donde se calcula la derivada parcial de las pérdidas de potencia activa frente a una inyección de reactivos.

$$[\eta_k] = \left[\frac{\partial P_L}{\partial Q} \right] = [J_1] \cdot \left[\frac{\partial P_L}{\partial V} \right] + [J_2] \cdot \left[\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right] \quad (14)$$

Donde, $[J_1]$ y $[J_2]$ son respectivamente las transpuestas de las inversas de las submatrices $[J_{22}]$ y $[J_{21}]$ de la matriz jacobiana usada en método de Newton para flujo de potencia.

B. Codificación del Problema

Una alternativa de solución se compone de una agrupación de nf bancos de tipo fijo más una cantidad nv de bancos de tipo variable. La capacidad instalada para cada caso, sea cual sea su estado de operación, queda determinado por el número de unidades instaladas N_{fj} con un límite máximo de nb unidades por barra. Sólo los bancos variables tienen la posibilidad de variar el número de unidades conectadas en cada nivel de carga. De esta manera una alternativa de solución es un arreglo de dimensiones $(nc+1) \times (nf+nv)$, donde nc es el número de niveles de carga comprendidos en el período de estudio.

En la figura 3 se presenta el número de unidades instaladas en cada nivel de carga para cada nodo seleccionado.

$$\begin{bmatrix} Barra_1 & \dots & Barra_{nf} & Barra_{(nf+1)} & \dots & Barra_{(nf+nv)} \\ N_1 & \vdots & N_{nf} & N_{(nf+1)_1} & \dots & N_{(nf+nv)_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_1 & \dots & N_{nf} & N_{(nf+1)_{nc}} & \dots & N_{(nf+nv)_{nc}} \end{bmatrix}$$

Figura 3. Codificación de una alternativa de solución.

Los depósitos de feromona son acumulados sobre dos tipos de matrices. La primera matriz, mostrada en (15) e identificada como matriz de ubicaciones $[\tau]_u$, es de dimensiones $2 \times n$ (donde n es el número de nodos del sistema), y en ella se expresa la deseabilidad aprendida por instalar en la barra k (con $k=1,2,\dots,n$) un banco de tipo fijo si es en la fila uno, o un banco de tipo variable si es en la fila dos. La segunda matriz, mostrada en (16) e identificada como matriz de feromonas $[\tau]_i$ para el nivel de carga i , de dimensiones $(nb+1) \times n$, expresa en la fila uno la deseabilidad aprendida de no conectar unidades de condensadores en la barra k durante el nivel de carga i (con $i=1,2,\dots,nc$). La fila dos indica la preferencia por ubicar una sola unidad; la fila tres, instalar dos unidades, y sucesivamente hasta la fila $(nb+1)$ para instalar nb unidades. Si se desea instalar condensadores variables ($nv > 0$) se requiere configurar una matriz $[\tau]_i$ por cada nivel de carga.

$$[\tau]_u = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \dots & \tau_{1k} & \dots & \tau_{1n} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \dots & \tau_{2k} & \dots & \tau_{2n} \end{bmatrix}_u \quad (15)$$

$$[\tau]_i = \begin{bmatrix} \tau_{1,1} & \tau_{1,2} & \dots & \tau_{1,k} & \dots & \tau_{1,n} \\ \tau_{2,1} & \tau_{2,2} & \dots & \tau_{2,k} & \dots & \tau_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{(nb+1),1} & \tau_{(nb+1),2} & \dots & \tau_{(nb+1),k} & \dots & \tau_{(nb+1),n} \end{bmatrix}_{c^i} \quad (16)$$

El mecanismo para construir una solución se desarrolla en dos fases. En la primera se determina la ubicación de los bancos dentro del sistema de distribución. Para este fin cada nodo k tiene una probabilidad de ser elegido dada por la ecuación (17), donde se reúnen los rastros de feromona de la matriz (15) con la información heurística de la matriz (14). Si el banco a ubicar es de tipo fijo se toma $t=1$, si es variable se toma $t=2$. La selección se realiza aleatoriamente por un mecanismo determinístico o un esquema probabilístico como la ruleta [10].

$$P_{tk} = \frac{(\tau_{tk}^u)^\alpha \cdot (\eta_k)^\beta}{\sum_{l \in N^k} (\tau_{tl}^u)^\alpha \cdot (\eta_l)^\beta} \quad (17)$$

Posteriormente se determina la capacidad de los bancos instalados durante la primera fase. Para ello se calcula la probabilidad de instalar N_f unidades en el nodo k durante el nivel de carga i por medio de la ecuación (18) en caso de tratarse de un banco fijo, o por medio de la ecuación (19) en caso de un banco variable. La selección se realiza de manera similar a la primera fase

$$P_{(N_f,k)^i} = \frac{\tau_{(N_f,k)^1} + \dots + \tau_{(N_f,k)^{nc}}}{\sum_{j=1}^{nc+1} \tau_{(j,k)^1} + \dots + \sum_{j=1}^{nc+1} \tau_{(j,k)^{nc}}} \quad (18)$$

$$P_{(N_f,k)^i} = \frac{\tau_{(N_f,k)^i}}{\sum_{j=1}^{nc+1} \tau_{(j,k)^i}} \quad (19)$$

Cada alternativa construida produce un determinado grado de pérdidas y de inversión que se almacena en el conjunto P . Esta interactúa con E para determinar dominancia y la menor distancia al frente por medio de la ecuación (10). Adicionalmente, aporta una variación al valor de feromona acumulado en las matrices de *Ubicación* y de *Capacidades* en forma proporcional a la menor distancia calculada por (11), usando para esto la ecuación (20) en caso de ser dominante, o la ecuación (21) en caso contrario. Adicionalmente, si la alternativa no resulta dominada por el conjunto E , es agregada a este conjunto y sirve de referencia para las nuevas iteraciones.

$$\tau_i = \tau_i + d^{\min} \quad (20)$$

$$\tau_i = \tau_i - d^{\min} \quad (21)$$

Inicialmente el conjunto Elitista se encuentra vacío, por lo que las primeras alternativas tienen una alta probabilidad de ingresar aunque su calidad sea baja. A medida que el proceso avanza el frente dominante adquiere mayor calidad y se torna más difícil ingresar a él.

5. SISTEMA DE PRUEBA

El algoritmo se pone a prueba sobre el sistema de nueve nodos presentado en [3]. La función objetivo ha sido modificada para considerar dos objetivos independientes que son: las pérdidas de potencia activa y el monto de la inversión, adoptando la forma:

$$v = \min \left[0,06 \cdot \sum_{i=1}^{nc} T_i \cdot P_i + 168 \cdot P_o \quad 4,9 \sum_{j=1}^u N_f \right] \quad (22)$$

Considerando la instalación de bancos fijos se obtienen las siguientes configuraciones:

| No | Nodos | Unidades | Inversión(\$) | Pérdidas(\$) |
|----|--------------|-------------|---------------|--------------|
| 1 | Sin instalar | 0 | 0 | 329932 |
| 2 | 1 | 1 | 1470 | 321071 |
| 3 | 1,4 | 1,1 | 2940 | 315287 |
| 4 | 1,5 | 1,2 | 4410 | 310829 |
| 5 | 1,4,5 | 1,1,2 | 5880 | 307099 |
| 6 | 1,4,5,6 | 1,2,1,1 | 7350 | 304331 |
| 7 | 1,4,5,6 | 1,2,1,2 | 8820 | 301860 |
| 8 | 1,5,6 | 1,3,3 | 10290 | 299816 |
| 9 | 1,4,5,6 | 1,1,2,4 | 11760 | 298040 |
| 10 | 1,4,5,6 | 1,1,3,4 | 13230 | 297113 |
| 11 | 1,5,6,7 | 1,3,4,2 | 14700 | 296132 |
| 12 | 1,5,6,7 | 1,3,4,3 | 16170 | 295445 |
| 13 | 1,4,5,6,7 | 1,1,3,4,3 | 17640 | 294836 |
| 14 | 1,4,5,6,7 | 1,1,3,4,4 | 19110 | 294595 |
| 15 | 1,4,5,6,7,8 | 1,1,3,4,2,3 | 20580 | 294161 |
| 16 | 1,4,5,6,7,8 | 1,1,3,4,3,3 | 22050 | 293806 |
| 17 | 1,4,5,6,7,8 | 1,1,3,4,4,3 | 23520 | 293668 |

Tabla 1. Esquemas de soluciones pertenecientes al frente elitista final para el caso de bancos fijos en el sistema de 9 nodos.

Cabe destacar que el algoritmo encuentra como alternativa de solución dentro del frente dominante a la mejor solución conocida en la literatura para un algoritmo mono-objetivo, que corresponde a la alternativa 9. La figura 4 ilustra la forma del frente dominante.

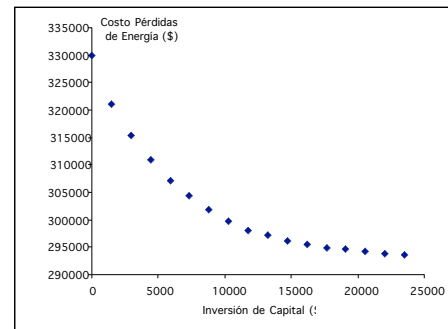


Figura 4. Ubicación de las alternativas en el espacio objetivo.

Con la información presentada, la empresa puede seleccionar una alternativa de acuerdo al flujo de capital disponible para hacer la inversión, o al nivel de pérdidas que desee lograr.

Para el caso de instalar bancos variables, las alternativas encontradas se presentan en la tabla 2.

| No | nc | Nodos | Unidades | Inversión(\$) | Pérdidas(\$) |
|----|-----|-----------|-----------|---------------|--------------|
| 1 | --- | ----- | 0 | 0 | 329932 |
| 2 | 0,3 | 1 | 1 | | |
| | 0,6 | 1 | 1 | 1470 | 321071 |
| | 1,1 | 1 | 1 | | |
| 3 | 0,3 | 1,4 | 1,1 | | |
| | 0,6 | 1,4 | 1,1 | 2940 | 315287 |
| | 1,1 | 1,4 | 1,1 | | |
| | 0,3 | 4 | 2 | | |
| 4 | 0,6 | 1,4 | 1,2 | 4410 | 310702 |
| | 1,1 | 1,4 | 1,2 | | |
| | 0,3 | 4 | 3 | | |
| 5 | 0,6 | 1,4 | 1,3 | 5880 | 307410 |
| | 1,1 | 1,4 | 1,3 | | |
| | 0,3 | 5 | 4 | | |
| 6 | 0,6 | 1,5 | 1,4 | 7350 | 304426 |
| | 1,1 | 1,5 | 1,4 | | |
| | 0,3 | 1,4,5,6 | 1,1,1,2 | | |
| 7 | 0,6 | 1,4,5,6 | 1,1,2,2 | 8820 | 301676 |
| | 1,1 | 1,4,5,6 | 1,1,2,2 | | |
| | 0,3 | 1,4,6 | 1,2,3 | | |
| 8 | 0,6 | 1,4,6 | 1,2,3 | 10290 | 298805 |
| | 1,1 | 1,4,6 | 1,3,3 | | |
| | 0,3 | 1,6 | 1,4 | | |
| 9 | 0,6 | 1,4,6 | 1,2,4 | 11760 | 297635 |
| | 1,1 | 1,4,6 | 1,3,4 | | |
| | 0,3 | 2,5,6 | 1,3,3 | | |
| 10 | 0,6 | 2,5,6 | 1,3,4 | 13230 | 295736 |
| | 1,1 | 1,2,5,6 | 1,1,3,4 | | |
| | 0,3 | 2,5,6 | 1,2,3 | | |
| 11 | 0,6 | 2,5,6 | 1,3,4 | 14700 | 293868 |
| | 1,1 | 1,2,5,6 | 1,1,4,4 | | |
| | 0,3 | 1,4,6 | 1,1,4 | | |
| 12 | 0,6 | 1,4,5,6 | 1,1,1,4 | 16170 | 292940 |
| | 1,1 | 1,4,5,6 | 1,2,4,4 | | |
| | 0,3 | 4,6 | 1,4 | | |
| 13 | 0,6 | 1,4,5,6 | 1,1,1,4 | 17640 | 292067 |
| | 1,1 | 1,4,5,6 | 1,3,4,4 | | |
| | 0,3 | 6 | 4 | | |
| 14 | 0,6 | 1,4,5,6 | 1,1,1,4 | 19110 | 291417 |
| | 1,1 | 1,4,5,6,7 | 1,3,2,4,3 | | |
| | 0,3 | 4,6 | 1,4 | | |
| 15 | 0,6 | 1,4,5,6,7 | 1,1,1,4,4 | 20580 | 290512 |
| | 1,1 | 1,4,5,6,7 | 1,3,2,4,4 | | |
| | 0,3 | 6,7 | 4,3 | | |
| 16 | 0,6 | 1,4,5,6,7 | 1,1,1,3,4 | 22050 | 289684 |
| | 1,1 | 2,4,5,6,7 | 1,2,4,4,4 | | |
| | 0,3 | 6,7 | 4,3 | | |
| 17 | 0,6 | 1,4,5,6,7 | 1,1,1,3,4 | 23520 | 289273 |
| | 1,1 | 1,4,5,6,7 | 1,3,4,4,4 | | |

Tabla 2. Esquema de control con bancos variables.

En estas condiciones la solución entregada por un algoritmo mono-objetivo corresponde a la alternativa 10. La figura 5 ilustra la forma del frente logrado.

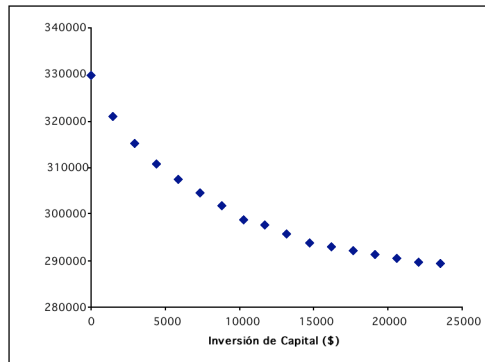


Figura 5. Frente dominante para el problema de ubicar bancos de tipo variable en el sistema de 9 nodos.

6. CONCLUSIONES

Fue implementado un algoritmo para la solución del problema de ubicación de bancos de condensadores fijos y variables usando un algoritmo colonia de hormigas orientado por el multiobjetivo DPGA.

La metodología propuesta permite encontrar un grupo de alternativas óptimas con diferentes grados de inversión y de reducción de pérdidas de potencia activa en un sistema de distribución. Como es de esperar, los frentes logrados contienen las alternativas dadas por los algoritmos mono-objetivos, donde se consideran ambos objetivos con igual grado de importancia. Sin embargo se puede apreciar que existen alternativas que permiten reducir aún más las pérdidas con incrementos en la inversión ligeramente suaves. Por otro lado, existen alternativas que permiten una amplia reducción de las pérdidas con inversiones de capital menores a las dadas por el mono-objetivo, y pueden resultar de mayor interés para la empresa distribuidora.

Cabe destacar que cada alternativa entregada cumple con las restricciones de regulación de tensión exigidas, con lo que se asegura la calidad de la energía entregada al usuario final. De este modo, se puede adoptar cualquier alternativa de acuerdo a las necesidades de la empresa.

Aunque los algoritmos multiobjetivo existentes en la literatura han sido propuestos usando algoritmos genéticos, se ha mostrado que es relativamente simple su adaptación a otras meta heurísticas basadas en población, como es la optimización por colonia de hormigas. El resultado es un algoritmo híbrido de buena calidad con un esfuerzo computacional ligeramente mayor que al de considerar la optimización de un simple objetivo.

La instalación de bancos de condensadores en paralelo con las cargas es una práctica habitual para la reducción de pérdidas, donde adicionalmente se obtiene una mejora en los perfiles de tensión del sistema. Sin embargo, en

sistemas radiales donde la caída de tensión es muy pronunciada puede resultar insuficiente esta ganancia de tensión. Bajo estas condiciones se debe implementar otra acción de control, como la instalación de reguladores de tensión.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gallego Ramón, Granada Mauricio y Escobar Antonio. "Reducción de Pérdidas por etapas en Sistemas de Distribución". Proyecto de Investigación. Grupo de Investigación en Planeamiento Eléctrico de la Universidad Tecnológica de Pereira. 2006
- [2] M.E. Baran and F.F. Wu. "Optional capacitor placement on radial distribution systems", IEEE Transactions on power Delivery. Vol. 4 No 9. pp 725-734. January 1989.
- [3] S. Sundharajan and Paliwa. "Optimal Selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm". IEEE transactions on Power Systems, vol 9, no. 3, pp 1499-1505. Aug 1994.
- [4] Gallego A., Ramón, Monticelli, José Alcir and Romero, Rubén "Optimal capacitor placement on radial distribution system". IEEE Transactions on Power System, vol. 16 no. 4. pp 630-637. November 2001.
- [5] Kalyanmoy Deb. "Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms". Departmental of mechanical Engineering. Indian Institute of technology, Kanpur, India. 2004.
- [6] Mendoza, Jorge E., et al Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm. IEEE Transactions on Power Systems. Vol 22, No 3. 2007.
- [7] Osyczka, A and Kundu, S. "A new method to solve generalized multicriteria optimization problems using the simple genetic algorithm". Structural Optimization 10(2), pp 94-99. 1995.
- [8] Dorigo, Marco and Stützle, Thomas. "Ant Colony Optimization". A Bradford Book. Massachusetts Institute of Technology. London. England. 2004
- [9] Romero Rubén, Gallego Ramón y Escobar Antonio. "Optimización en Sistemas Eléctricos I. Programación Lineal". Grupo de investigación en Planeamiento Eléctrico. Universidad Tecnológica de Pereira. 2003.
- [10] Romero Rubén, Gallego Ramón y Escobar Antonio. "Técnicas de Optimización Combinatorial". Grupo de investigación en Planeamiento Eléctrico. Universidad Tecnológica de Pereira. 2006.
- [11] Peñuela César, Granada Mauricio y Gallego Ramón. "Optimal Capacitors Placement and Sizing Using Ant Colony System". Revista Colombiana de Tecnologías De avanzada. Universidad de Pamplona. Vol 2 no 8. pp 61-67. 2006.