



# Optimización de la ubicación de los centros de carga en una industria

Enrique A. Padrón  
Ignacio Pérez

Agosto de 2001

## Resumen / Abstract

Se presenta una aplicación del método de iteración de punto fijo para determinar la ubicación óptima de los centros de carga en una industria que minimice el costo presente neto del proyecto y contemple las restricciones técnicas necesarias. El método considera el costo de inversión e instalación de los cables, así como las pérdidas de energía en los alimentadores. La metodología propuesta considera una curva diaria característica de variación de la carga para cada receptor.

Palabras clave: optimización, centros de carga

*This paper presents an application of the fixed point iteration method to find the optimal load-center placement on industry for minimizing the project net present cost and complying with the appropriated technical constraints. The cable investment and installation cost as well as the feeder energy losses are taken into account. The proposed methodology considers a characteristic daily variation curve for each load.*

*Key words: optimization, load center*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de suministro eléctrico industrial tienen como objetivo alimentar de energía eléctrica a las cargas industriales al menor costo posible y manteniendo los parámetros de eficiencia y calidad de la energía requeridos por estas.

El encarecimiento de la energía ha determinado el creciente interés nacional e internacional por el diseño de sistemas eficientes. Acertadas decisiones de diseño pueden ahorrar cuantiosas cifras en el futuro.

## DESARROLLO

La ubicación óptima de la subestación o centro de carga estará siempre avalada por una mayor ventaja o conveniencia económica a la vez que posibilita la

construcción de un sistema de suministro más fiable desde el punto de vista técnico, con ello se reduce la longitud de los circuitos de voltaje secundario, las pérdidas de energía, las desviaciones de voltaje, la zona de fallas, etcétera.

Para la ubicación de los centros de cargas se utiliza normalmente, el conocido método de la elipse,<sup>1</sup> no obstante, esta metodología presenta algunas insuficiencias que se señalan seguidamente:

1. No considera los costos por concepto de inversión, instalación y explotación de los elementos del sistema eléctrico.
2. No considera las técnicas modernas de contabilidad para la evaluación de proyectos.

3. Sopesa de igual manera la importancia de los centros de carga (centroides) calculados para estados de carga desiguales (máxima, mínima, etcétera).

4. No considera explícitamente la existencia de zonas no permitidas para la ubicación, donde por razones del proceso productivo es imposible instalar una pizarra eléctrica.

En el trabajo se desarrolla un algoritmo que resuelve las insuficiencias presentadas y tiene en cuenta la variabilidad de las cargas en el tiempo.

#### Información requerida

1. Receptores:

- Coordenadas geográficas.
- Datos nominales.
- Gráfico de carga.

2. Zonas permitidas (se describen por rectángulos definidos por sus vértices superior izquierdo e inferior derecho).

3. Datos económicos:

- Tablas de costo de conductores.
- Tablas de costo de instalación.
- Otros datos para la evaluación del proyecto.

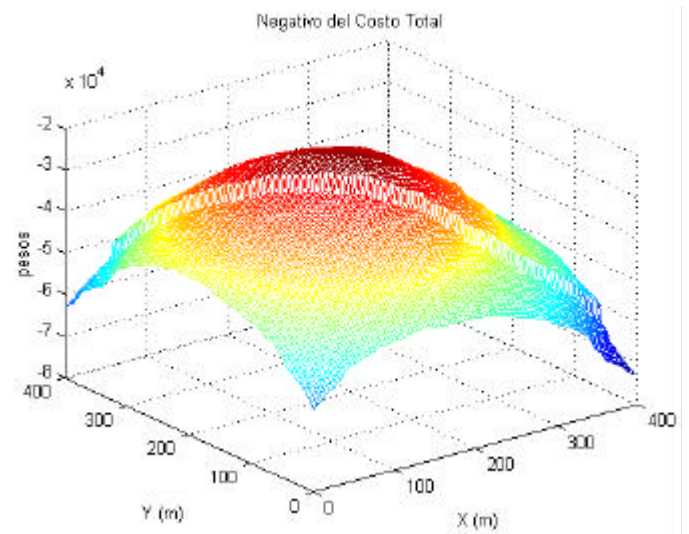
#### METODOLOGÍA

En la bibliografía consultada comúnmente se supone que la función de gastos totales para la ubicación del centro de carga es perfectamente convexa, es decir, que tiene su valor mínimo en el punto ideal de ubicación y que a medida que se aleja de este, los costos se incrementan proporcionalmente a la distancia del punto óptimo. Sin embargo, la consideración en el problema de las restricciones de caída de voltaje, provoca que al modificar la ubicación del centro de carga, se tengan que realizar cambios de calibres que invalidan esta suposición previa.

Con la ayuda de un programa en lenguaje Matlab 5.3 se realizaron los cálculos de los gastos totales para varios ejemplos de talleres (datos reales tomados por estudiantes de maestría en la Universidad de Cienfuegos).

En la figura 1 se muestran los resultados de uno de estos ejemplos.

En la figura 1, X ,Y representan, los ejes de las coordenadas de la industria en análisis, y el eje Z representa el negativo de los costos totales (se colocó el negativo de los costos para facilidades de visualización del gráfico), por lo tanto, el punto ideal de ubicación del centro de carga es en la cima del gráfico.



1

Sin embargo, a diferencia de lo comúnmente aceptado, se puede observar claramente que la superficie no es perfectamente cóncava, que existen discontinuidades, debido a que cuando el centro de carga se aleja de determinados receptores, por razones de caídas de voltaje es necesario cambiar el calibre de los conductores correspondientes, para garantizar una caída de voltaje menor o igual a la máxima admisible, en tales casos cambian los costos: el de instalación sube y el de explotación baja.

Esta situación constituye una objeción importante contra el uso del concepto de zonas de incremento de los gastos, concepto que presupone la convexidad de la función de costos. En otras palabras, un punto más cercano al óptimo puede tener costos superiores a otro punto más lejano de este.

Esto es importante considerarlo ya que en muchas ocasiones la pizarra no se puede instalar en el punto eléctricamente idóneo, por razones de características propias de la industria.<sup>2</sup>

Para evitar este inconveniente, el método desarrollado en el presente trabajo,<sup>3</sup> incluye explícitamente las restricciones de zonas no permitidas, al determinar el óptimo local a cada zona permitida y posteriormente seleccionar el óptimo global como el de menor costo total.

La determinación de las zonas permitidas debe realizarse por el equipo multidisciplinario encargado del diseño de la planta, con vistas a valorar las posibilidades técnico-económicas de cambiar la ubicación de otros equipos y no del centro de cargas eléctricas.<sup>2</sup>

En la figura 2 se representa la solución obtenida para el mismo ejemplo, pero en este caso especificando las zonas permitidas.

La zona sombreada con el tono más intenso es donde los gastos totales son menores y solo se podrá ubicar en los lugares que existe superficie en el gráfico; como puede apreciarse lo conveniente es en el mogote central, pero dentro del mismo hay discontinuidades que pueden provocar incrementos notables del costo total, en cuestión de metros de diferencia por concepto de cambiar de calibre de algunos alimentadores.

Los pasos seguidos para implementar la metodología presentada son los siguientes:

I. Determinación de los coeficientes para la evaluación de los costos (inversión, instalación y explotación).

1. Se calcula el costo anual  $T_k$  de un kilowatt (kW) de pérdidas para los distintos  $m$  estados de carga considerados.

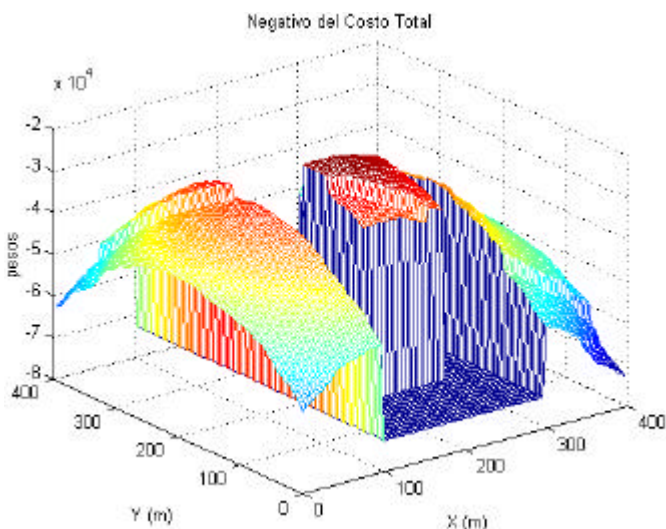
$$T_k = [\$ / kW \cdot h]_k \cdot \text{horas}_k \cdot [\text{días} / \text{año}]$$

Añadiendo, al estado correspondiente a la máxima demanda, el costo de facturación mensual en peso /kilowatt.

$$T_{k \text{ máx}} = T_{k \text{ máx}} + [\$ / kW_{\text{máx}}] \cdot [\text{meses} / \text{año}]$$

2. Se calculan los coeficientes de costo anual de explotación para la transferencia de potencia desde la fuente a cada receptor a través de un conductor de resistencia unitaria

$$Isqr_i = \sum_{k=1}^m I_{i,k}^2 \cdot T_k$$



2

donde:

$I_{i,k}$ : Corriente del receptor  $i$  en el estado  $k$ .

3. Se calcula el coeficiente de valor presente neto  $K_p$ ,

$$K_p = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\left(1 + \frac{TIR}{100}\right)^i}$$

donde:

$N$ : Número de años de evaluación del proyecto.

$TIR$ : Tasa interna de retorno o tasa de descuento considerada al efecto.<sup>4</sup>

II. Determinación para cada zona permitida de la ubicación óptima del centro de carga mediante una variante del método de iteración de punto fijo<sup>5</sup> que se describe seguidamente:

1. Se toma como aproximación inicial de la ubicación el centro de la zona correspondiente permitida.

2. Se efectúa el cálculo técnico inicial de la sección de los conductores, solo teniendo en cuenta el efecto térmico de la corriente.

3. Se calculan las longitudes radiales correspondientes desde el centro de carga seleccionado a cada receptor.

$$L_i = \sqrt{(X_i - X_s)^2 + (Y_i - Y_s)^2}$$

donde:

$L_i$ : Distancia del centro al receptor  $i$  (m).

$X_i, Y_i$ : Coordenadas de la carga  $i$  (m).

$X_s, Y_s$ : Coordenadas del centro de carga (m).

4. Se chequean los conductores seleccionados por caída de voltaje:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{n_i} \cdot Z_i \cdot L_i \cdot 100}{V_n}$$

Si  $\Delta V\% > 2\%$  se selecciona un nuevo conductor que garantice una caída menor de un 2%.

5. Se obtienen los coeficientes de costo por unidad de longitud de cada alimentador a partir de sus datos:

$$CT_i = 3 \cdot Isqr_i \cdot Rc_i \cdot K_p / 1000 + Cl_i$$

donde:

$Rc_i$ : Resistencia del conductor del receptor  $i$  ( $\Omega/m$ ).

$Cl_i$ : Costos de inversión por unidad de longitud que comprenden: el costo de los conductores según el calibre requerido, el costo de los soportes, si es por

bandejas o por tuberías y el costo de la mano de obra de acuerdo con las características de la instalación. Se tomaron los valores actuales del Sistema de Precios de la Construcción.<sup>6</sup>

6. Se calculan las nuevas coordenadas del centro de carga mediante la fórmula de iteración en punto fijo:

$$X_s^{(t+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CT_i \cdot X_i}{(X_i - X_s^{(t)})^2 + (Y_i - Y_s^{(t)})^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{CT_i}{(X_i - X_s^{(t)})^2 + (Y_i - Y_s^{(t)})^2}}$$

$$Y_s^{(t+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CT_i \cdot Y_i}{(X_i - X_s^{(t)})^2 + (Y_i - Y_s^{(t)})^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{CT_i}{(X_i - X_s^{(t)})^2 + (Y_i - Y_s^{(t)})^2}}$$

7. Se chequea la inclusión de las nuevas coordenadas obtenidas dentro de la zona permitida, y en caso de una violación de los límites, la coordenada correspondiente recibe el valor del límite violado.

8. Se chequea la convergencia de la ubicación actual con respecto a la anterior hasta obtener un error inferior en porcentaje a una milésima del valor absoluto de dicha solución.

9. En caso de no obtenerse convergencia, se regresa al punto 3 para continuar iterando.

10. Se obtienen los costos totales de la variante óptima local a la zona optimizada, mediante:

$$CT = \sum_{i=1}^n CT_i \cdot L_i$$

III. Se selecciona la variante óptima global a partir de los óptimos locales obtenidos para cada zona permitida.

## CONCLUSIONES

Las soluciones obtenidas por el método aquí desarrollado, así como las de la elipse se compararon contra la ubicación óptima de la subestación obtenida por búsqueda exhaustiva metro a metro y los resultados fueron muy alentadores, en todos los casos estudiados, el algoritmo de optimización produjo una diferencia en gastos con respecto a la ubicación óptima

menor de un 3 % en menos de 20 iteraciones, mientras que la elipse en algunos superó el 30 % de diferencia.

Los ejemplos empleados no incluyeron las limitaciones en cuanto a zonas de ubicación permitidas, ya que, de incluir las mismas, las diferencias en resultados se ampliarían desfavorablemente para el método de la elipse.

El método presentado, permite utilizar las técnicas modernas de la contabilidad donde se sopesan los criterios de costo de explotación y costos de instalación. De esta forma, la ubicación responde al análisis de gastos totales y por ende la propuesta siempre estará avalada económicamente.

Por otra parte, se demuestra que, cuando se desplaza del lugar óptimo de la ubicación del centro de carga, no en todos los sentidos los gastos aumentan en la misma proporción, existen discontinuidades en la superficie de costo producto de los necesarios cambios de calibre en los alimentadores de algunas cargas por concepto de caída de voltaje.

## REFERENCIAS

1. Feodorov, A. A. y E. Rodríguez: *Suministro eléctrico de empresas industriales*, Ed. Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, 1980.
2. Dunki-Jacobs, J. R. and Chet E. Davis: "An Argument and Procedure for Conceptual Power Systems Design Studies", *IEEE Transaction on Industry Applications*, No. 2, pp. 205-212, 1994.
3. Anderberg, M. R.: *Cluster Analysis for Applications*, 1973
4. Rasmusson, Paul R.: "Transformer Economic Evaluation", *IEEE Transaction on Industry Applications*, No. 2, Vol. IA-20, pp. 355-363, March/April, 1984.
5. *Partitioning Cluster Algorithms* (fotocopia), s/f.
6. *Sistema de Precios de la Construcción*, t. II, Ciudad de La Habana, 1999.

## AUTORES

Enrique A. Padrón Padrón, Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos, Cuba  
e-mail: apadron@fmec.ucf.edu.cu

Ignacio Pérez Abril, Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba  
e-mail: iperez@uclv.etecs.cu

