



## Optimización Metaheurística para la Ubicación de Banco de Capacitores y Reguladores de Tensión en Líneas de Distribución bajo Condiciones de Incertidumbre

Pablo Sosa, Fermín Zarza, Enrique Buzarquis

Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

### 1.1 Resumen

Los operadores de distribución de energía eléctrica, en lo que se refiere a la configuración y optimización de los equipos utilizados, poseen softwares especializados para la ubicación óptima de los componentes que conforman el sistema de distribución para el caso de operación y expansión de los mismos.

Normalmente, para la evaluación de la expansión del sistema de distribución, donde también se evalúan las inversiones de estos equipos, no son consideradas las incertidumbres que puedan afectar al funcionamiento del sistema de distribución, por ello, en este trabajo se desarrolla una herramienta computacional que permite la optimización en el uso de los equipos, utilizando una metodología metaheurística para resolver el problema de optimización en la ubicación de Banco de Capacitores y Reguladores de Tensión en un sistema de distribución genérico, bajo condiciones de incertidumbre.

Este es un problema de programación no lineal entero mixto, con una naturaleza combinatorial que conduce a un número extremadamente grande de alternativas de solución para sistemas eléctricos de distribución. El algoritmo de optimización implementado es conocido como *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO), el cual es una herramienta híbrida que combina las características de Estrategias Evolutivas y Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).

En la metodología aplicada, la cantidad de partículas y el número de generaciones fue aumentando de manera gradual con el objetivo de evaluar la robustez del algoritmo, puesto que para una aplicación real no se espera que el algoritmo sea corrido varias veces, sino apenas unas pocas veces, y evaluada la convergencia del algoritmo, se confía en el resultado.

Como resultado de este trabajo, se obtuvieron los valores mínimos de costos de operación y ubicación óptima de Banco de Capacitores y Reguladores de Tensión, donde además se mejoró la calidad en el suministro de la energía eléctrica posterior a la instalación de los equipos.

### 1.2 Palabras clave

EPSO, Sistema de Distribución, Incertidumbre, Banco de Capacitores, Reguladores de Tensión.



---

## 2. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la optimización en la generación, transmisión y utilización de la energía debería ser uno de los paradigmas de toda nación para lograr un desarrollo tecnológico, económico e industrial sustentable que no degrade al medio ambiente. En el caso de Paraguay esta consigna es de mayor importancia aún debido a que los recursos hidroeléctricos constituyen una de las mayores riquezas del país. A consecuencia de esto, los sistemas de Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, también llamados Sistemas Eléctricos de Potencia (EPSs - *Electric Power Systems*), cumplen un rol fundamental en el desarrollo de la nación, constituyéndose en la base del sistema energético nacional e inclusive mundial [1].

Hoy en día los consumidores son cada vez más exigentes con la disponibilidad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica. Esta situación de la calidad del servicio ha motivado la realización de este estudio que puede servir para realizar de manera inteligente inversiones tecnológicas para mejorar su gestión y la prestación de servicio.

En los Sistemas Eléctricos de Distribución la reconfiguración y optimización de alimentadores primarios permite minimizar las pérdidas, mejorar los niveles de tensión y equilibrar la carga de la red, utilizando para ello métodos como la ubicación de banco de capacitores y reguladores de tensión, balanceo de carga, transferencia de carga (*Switching*), logrando una significativa mejora en la confiabilidad, eficiencia y calidad de la energía eléctrica que se entrega a los usuarios [2].

La Administración Nacional de Electricidad ANDE, en lo que se refiere a la reconfiguración y optimización de sus alimentadores primarios de media tensión utiliza algunos criterios tales como los 2/3 de la carga reactiva total del alimentador instalado a los 2/3 de distancia desde la subestación para realizar la compensación de los circuitos de distribución, mediciones para el balanceo de carga y lo que corresponde a la transferencia de carga no existen estudios que sustenten su aplicación, lo que ha provocado pérdidas técnicas considerables, es por ello que se hace necesario un estudio y análisis de sus redes de distribución, mediante programas informáticos de análisis técnico, con la finalidad de optimizar la operación y planificación del sistema eléctrico de distribución

## 3. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN

El Sistema de Distribución constituye una parte importante del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP); debido a su magnitud y complejidad, presenta un gran dinamismo y un rápido avance tecnológico producto de los continuos cambios que en él se presentan, ya sea por la incorporación de nuevos elementos o debido al crecimiento propio de la demanda eléctrica.

El mayor porcentaje de las pérdidas, en los sistemas de distribución, se presentan en los alimentadores primarios y redes secundarias, por lo cual hace imprescindible que se tomen estrategias de tipo técnico para reducirlas debido a la incidencia económica que ello implica.

De ahí que se vuelve esencial minimizar tanto los costos de inversión como los costos de operación del Sistema de Distribución, mediante procesos de optimización, que busquen este propósito. Se pueden utilizar diferentes puntos de vista para la optimización en un Sistema de Distribución; entre ellos se puede citar:

- Reconfiguración de alimentadores primarios.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

- 
- Balanceo de carga en alimentadores primarios.
  - Ubicación y tamaño de bancos de capacitores y reguladores de tensión.

En este estudio se analizarán los flujos de potencia en un sistema de distribución utilizando un sistema de distribución genérico de 30 barras, con la intención de elegir y construir un algoritmo trifásico especializado para sistemas de distribución que se enfoque básicamente en la ubicación óptima de bancos de capacitores y reguladores de tensión.

Cabe destacar que en este trabajo todos los cálculos y los estudios son realizados en el nivel de distribución de la energía eléctrica.

#### 4. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Este trabajo contempló el uso de las siguientes herramientas para la búsqueda de la solución óptima del sistema de distribución.

##### 4.1 MATLAB

MATLAB (abreviatura de *Matrix Laboratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

##### 4.2 MATPOWER

Matpower es un paquete de Matlab (formato .m) para la solución de flujo de potencia y los problemas de flujo de potencia óptimos. Se pretende que sea una herramienta de simulación para los investigadores y educadores que es fácil de utilizar y modificar. Matpower está diseñado para dar el mejor rendimiento posible, manteniendo el código sencillo de entender y modificar. La página de inicio de Matpower se puede encontrar en: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>

##### 4.3 EPSO

*Evolutionary Particle Swarm Optimization* es un novedoso algoritmo de optimización metaheurístico que combina los conceptos de Estrategias Evolutivas (*Evolution Strategic*) y Optimización de Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization*).

Un número significativo de algoritmos han sido desarrollados bajo el concepto de Estrategias Evolutivas. Los algoritmos evolutivos han tenido su inspiración en la biología de la evolución de las especies, estos se basan en la selección Darwinista para promover el progreso a través del



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

conocimiento óptimo. Los conceptos de Optimización de Enjambre de Partículas, PSO, se basan en diferentes conceptos de la naturaleza referida al comportamiento de distintos grupos de especies animales. El algoritmo trata de imitar el comportamiento colectivo o social de bandadas de aves, cardúmenes de peces o enjambres de abejas como un conjunto de partículas que evoluciona en el espacio de búsqueda motivado por tres factores: inercia, memoria y cooperación.

El algoritmo de EPSO se basa en un conjunto de partículas que evolucionan en el espacio de búsqueda tratando de encontrar un punto óptimo en el mismo. A diferencia de PSO, la evolución no sólo se ve en el comportamiento de las partículas sino también en los pesos que afectan al movimiento de estas a medida que se avanza en el espacio de búsqueda. Una de las características más importantes es que es un método auto adaptivo, que ajusta automáticamente sus parámetros o comportamientos en respuesta a la manera en que progresa la solución del problema.

La adaptación es típicamente comandada por reglas. En la mayoría de los casos estas reglas son heurísticas y dependen ampliamente del conocimiento ganado por los investigadores en observar cómo un algoritmo se comporta frente a una clase de problema. Un método auto adaptivo requiere que el algoritmo desarrolle por sí mismo un proceso de cambio de su comportamiento, en lugar de obedecer una regla externa. Esto es como si el método tiene algún tipo de inteligencia en su algoritmo. Una descripción detallada del mecanismo del algoritmo EPSO se presenta en los trabajos [3] y [4].

#### 4.4 MÉTODO MONTE CARLO

El método de Monte Carlo es un método numérico que permite resolver una amplia variedad de problemas matemáticos y de ingeniería mediante la simulación de números al azar (aleatorios). Números comprendidos entre cero y uno que se generan en forma aleatoria y que proporcionan igual probabilidad de ocurrencia para intervalos de misma amplitud.

Su nombre se debe a una población del principado de Mónaco, célebre por su casa de juegos de azar. Precisamente, uno de los aparatos mecánicos más sencillos para generar números aleatorios es la ruleta.

Una de las aplicaciones más frecuente de Monte Carlo es la simulación de procesos, cuya evolución depende de factores aleatorios, donde cada simulación representa una realización del proceso estocástico. Para la simulación se requiere generar números aleatorios según las distribuciones de probabilidad asignadas al comportamiento de  $c/\text{input}$  (variable de entrada) [5].

Para este estudio, un proceso estocástico representa una variable que evoluciona en alguna forma de manera aleatoria, puede ser en tiempo continuo o discreto, así una de las formas más simples es la caminata aleatoria en tiempo discreto, cuya dinámica se describe según la siguiente ecuación:

$$x_t = x_{t-1} + e_t$$

El proceso  $x_1$  es además de estado discreto su valor inicial  $x_0$  es conocido y en cada tiempo  $t = 1, 2, 3, \dots$  toma de salto  $e_t$  de tamaño 1 hacia arriba o abajo con probabilidad  $\frac{1}{2}$ . Si se define una probabilidad  $p$  para el salto hacia arriba y  $(1-p)$  hacia abajo, entonces la distribución de probabilidad de  $x_t$  está dada por la distribución binomial. La caminata aleatoria satisface la propiedad de Markov, es decir, la distribución de probabilidad de  $x_{t+1}$  depende solamente de  $x_t$  y no de lo que haya pasado



antes de  $t$ , en otras palabras, un evento futuro depende del pasado sólo a través de lo sucedido en el presente.

Para este trabajo, fueron tomados dos procesos estocásticos [6]:

- Para el modelado de la variación de la demanda, Movimiento Browniano Geométrico (GBM - *Geometric Brownian Motion*)
- Para el modelado del precio de la energía, Proceso de Reversión a la Media.

## 5. METODOLOGÍA

Para la ubicación de reguladores y capacitores en líneas de distribución bajo condiciones de incertidumbre fue desarrollada una metodología novedosa de optimización metaheurística, donde se busca para resolver el problema de optimización en la ubicación óptima de Reguladores de Tensión y/o Banco de Capacitores en Líneas de Distribución, considerando incertidumbre en el crecimiento de la demanda y en el costo de la energía eléctrica. Este es un problema de programación no lineal entero mixto, con una naturaleza combinatorial que conduce a un número extremadamente grande de alternativas de solución para sistemas eléctricos de distribución.

El algoritmo de optimización implementado es conocido como *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO), el cual es una herramienta híbrida que combina las características de Estrategias Evolutivas y Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). Como resultado de la propuesta se obtienen las ubicaciones óptimas de los Reguladores de Tensión y/o Banco de Capacitores independientemente de la variación de la demanda en un periodo de cinco años.

Los métodos actuales utilizados por la ANDE en la ubicación de los Reguladores y Banco de Capacitores en las redes de Distribución son realizados con el software CYMDIST, si bien el software posee la capacidad de ubicar óptimamente los Reguladores de Tensión y/o Banco de Capacitores, no posee el potencial de pronosticar el crecimiento de la Demanda ni la variación del costo de la Energía.

Con la metodología propuesta, además de ubicar óptimamente los Reguladores y/o Banco de Capacitores en las Líneas de Distribución, será, maximizar el Beneficio Social. Estas ubicaciones servirán para todas las combinaciones de crecimiento de Demanda y variaciones futuras en el costo de la eléctrica que se podrían dar en un periodo preestablecido de cinco años.

Con la evolución de los resultados obtenidos posteriormente se determinan los beneficios técnicos y económicos.

## 6. RESULTADOS

El algoritmo de optimización EPSO fue programado en MATLAB para distintos números de partículas. Mediante la utilización de una CPU con procesador Intel (R) Core (TM) i5-4570 CPU @3.20Ghz el resultado óptimo de este sistema se encontró de manera relativamente rápida (aproximadamente 52 horas).

Para este trabajo, fue utilizado el sistema de 34 Nodos de la IEEE. Para las simulaciones, fueron previstas la posibilidad de instalación de los bancos de capacitores y reguladores en cualquiera de los puntos. El horizonte de tiempo analizado fue de 5 años.

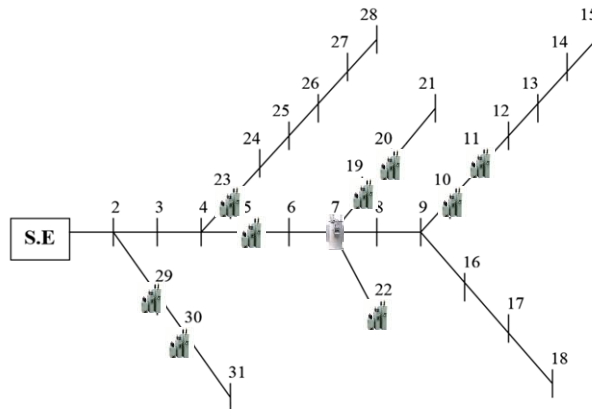
XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

La Función Objetivo definida para este trabajo fue la maximización del beneficio social, el cual se obtiene a partir de la diferencia de los costos operativos del sistema Post Inversión y Pre Inversión (ISW), descontados los costos de inversión (IC).

$$FO = ISW - IC$$

Una vez realizada la simulación, la configuración óptima resultó con una maximización de la función objetivo de 47.515.024 [USD], para un costo de inversión de 196.800 [USD]. El ahorro de costo para la configuración solución es de 47.711.824 [USD] que corresponde al ISW.

En la figura 1 se presenta el sistema de estudio una vez concretadas las inversiones.



**Figura 1: Sistema eléctrico con la solución óptima Post-Inversión**

Como se verifica en [7], existe un alto grado de compromiso entre la calidad de partículas y el número de generaciones a escoger en la solución del problema, ya que cuanto mayor el número de partículas, es probable que la solución óptima sea encontrada de manera más rápida; sin embargo, en el camino se podrán perder algunas soluciones cuyo estudio posterior podría brindar datos importantes sobre la flexibilidad que se podría obtener en el desarrollo del plan de inversiones. Mientras que, si se escoge un número pequeño de partículas y generaciones, es probable que la solución óptima no sea encontrada, quedando el algoritmo detenido en una solución que pertenezca a un óptimo local.

En la metodología aplicada, la cantidad de partículas y el número de generaciones fue aumentando de manera gradual de forma tal que permita el estudio de la robustez del algoritmo, puesto que para una aplicación real no se espera que el algoritmo sea corrido varias veces, sino apenas una corrida y se confía en el resultado.

En la tabla 1 se observa la comparación de costos de operación total del sistema. En el nivel intermedio del cuadro se observan los costos operativos en los 5 años de estudio antes de realizar ninguna inversión. En el nivel inferior los costos después de la instalación de los equipos atendiendo a la mejor solución obtenida mediante el EPSO.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Tabla I: Costos de operación total del sistema

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Pre-Inversión	\$ 10.632.680	\$ 15.689.068	\$ 22.961.357	\$ 33.006.169	\$ 45.087.119
Post Inversión	\$ 4.754.823	\$ 6.530.905	\$ 10.054.340	\$ 16.578.410	\$ 26.716.774

6. MEJORAMIENTO DEL NIVEL DE TENSIONES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Las figuras 2 y 3, presentadas a continuación, corresponden a la tensión promedio en [pu] en cada nodo, obtenidas de las simulaciones discretizadas de las cargas en los años de estudio para las cargas en Pico y Carga Media.

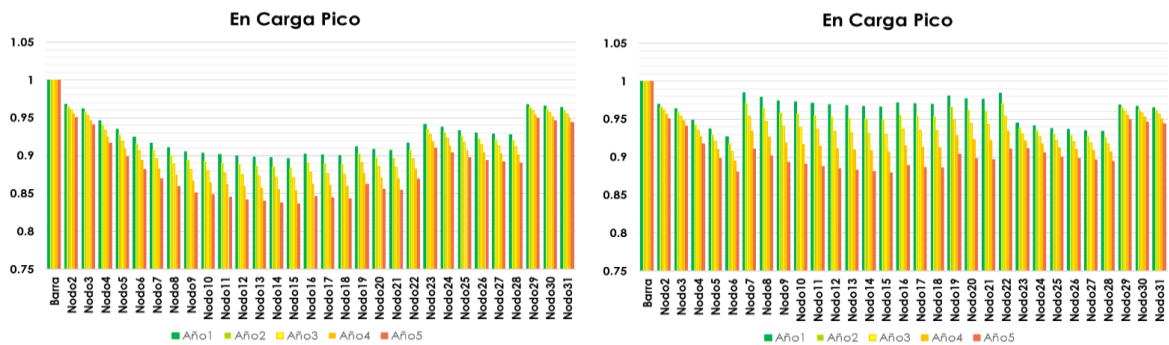


Figura 2: Comparación de los niveles de tensión a) Pre-Inversión y b) Post-Inversión – Carga Pico

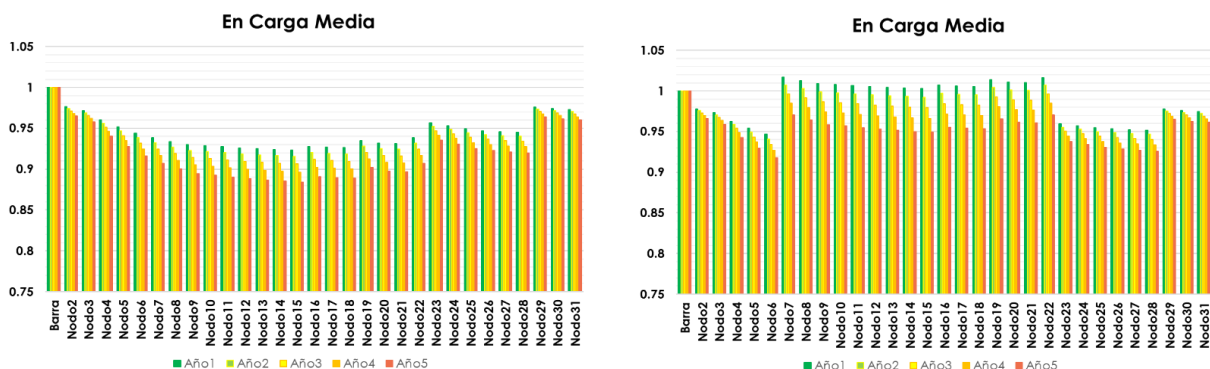


Figura 3: Comparación de los niveles de tensión a) Pre-Inversión y b) Post-Inversión – Carga Media

Se puede observar en las gráficas de tensiones pre-inversión (Figura 2 y 3, a) que los niveles de tensión disminuyen con el correr de los años, y son críticas en algunos nodos.



**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Para el caso post-inversión (Figura 2 y 3, b), se presenta la tensión promedio en [pu] en cada nodo, obtenidas de las simulaciones discretizadas de las cargas en los años de estudio considerando la inversión y ubicación óptima de los equipos.

Se puede observar en la gráfica de tensiones pos-inversión que los niveles de tensión mejoraron considerablemente y como era de esperarse siguen disminuyendo con el correr de los años.

## 7. CONCLUSIONES.

Se desarrolló una herramienta computacional en Matlab aplicando el método metaheurístico EPSO, que permitió la optimización en el uso de Banco de Capacitores y/o Reguladores de Tensión. Se implementó el flujo de potencia en redes de distribución de energía eléctrica de 23 kV.

Con la mejor solución encontrada se redujeron considerablemente los costos de operación del sistema y se mejoró la calidad en el suministro de la energía eléctrica gracias a la ubicación óptima de los equipos (Banco de Capacitores y Reguladores de Tensión).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gardel, P, “Compensación de Potencia Reactiva en un contexto multiobjetivo mediante algoritmo de Colonia de Hormigas”. Trabajo Final de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, mayo 2006.
- [2] Correa, O, “Estudio de Reconfiguración y Optimización de los Alimentadores de la Estación Machala Perteneciente a la Corporación Nacional de Electricidad S. A. – Regional el Oro”. Trabajo Final de Grado, Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana, 2010.
- [3] Miranda, V., Fonseca, N. “EPSO-Best-Of-Two-Worlds Meta-Heuristic Applied to Power System Problems,” Proceedings Congress on Evolutionary Computation, vol. 2, pp. 1080-1085, Honolulu, Hawaii, USA, 2002.
- [4] Miranda, V., Fonseca, N. “New Evolutionary Particle Swarm Algorithm (EPSO) Applied to Voltage/Var Control,” Proceedings of 14th Power Systems Computation Conference (PSCC'02), Sevilla, Spain, 24-28 Jun 2002.
- [5] Barriosa, J., Serranoa, D., Monleónb, T., Caroc, J. “Los modelos de simulación de eventos discretos en la evaluación económica de tecnologías y productos sanitarios”. Discrete-event simulation models in the economic evaluation of health technologies and health products. Gaceta Sanitaria. 2008.
- [6] Buzarquis, E., Blanco, G., Olsina, F., Garcés, F. (2010) “Valuing Investments in Distribution Networks with DG under Uncertainty”. IEEE/PES T&D 2010 Latin America. 10 Noviembre 2010. São Paulo – Brasil.
- [7] Buzarquis, E.; Blanco, G.; Olsina, F.; Garcés, F. “Optimización Metaheurística de la Expansión de los Sistemas de Distribución con GD” - IX LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, Mar del Plata, Argentina. Año: 2011.