

# Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de SVCs Usando Optimización por Enjambre de Partículas y Considerando Fuentes de Energía Intermitentes

## Optimal Location and Sizing of SVCs Using Particle Swarm Optimization and Considering Intermittent Sources of Energy

Castillo, William; Muñoz, Juan Carlos\*; Hernández, Jean Carlos; Dávila, Marisol; Ballester, Lelis Nelson  
Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes,  
Mérida, Venezuela.  
[\\*munozj@ula.ve](mailto:*munozj@ula.ve)

### Resumen

*Este estudio se centra en desarrollar un algoritmo basado en Optimización por Enjambre de Partículas o PSO (Particle Swarm Optimization), para encontrar la ubicación y dimensionamiento óptimo de SVCs (Static Var Compensators) en sistemas de potencia considerando la incertidumbre de la potencia generada asociada a fuentes solares fotovoltaicos y generadores eólicos, con el objetivo de minimizar las pérdidas activas del sistema, mientras se satisfacen las restricciones operativas del mismo. El comportamiento intermitente de las fuentes de energía renovables se toma en cuenta mediante el empleo de muestras representativas de la variación de la irradiancia solar en el caso de los generadores solares fotovoltaicos, y de la velocidad del viento en el caso de los generadores eólicos; luego, mediante el uso de modelos apropiados, se calcula la potencia de salida de dichos generadores. En la implementación del algoritmo propuesto, se utilizó Matpower® para la obtención de la solución de los flujos de potencia requeridos de una red de prueba IEEE de 300 barras. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto proporciona soluciones óptimas para la ubicación y dimensionamiento de dispositivos de compensación de potencia reactiva, disminuyendo las pérdidas totales del sistema, mientras se mantienen los perfiles de tensión en niveles adecuados ante las variaciones de potencia asociada a las fuentes intermitentes de energía.*

**Palabras claves:** Energías Renovables, Capacitores, Flujo de Carga, Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).

### Abstract

*This study is focused on developing an algorithm based on Particle Swarm Optimization (PSO), aimed at optimally locating and sizing SVCs (Static Var Compensators) in power systems, considering uncertainties of the output power associated with photovoltaic and wind turbine based generators, with the objective of minimizing the system active power losses, while satisfying operating constraints. The intermittent behavior of the renewable energy sources is considered by using representative samples of the solar irradiance for the photovoltaic based generators, and the wind speed for the wind turbine based generators; afterwards, by means of appropriate models, the output power of these generators are computed. The proposed algorithm is implemented using Matpower® for the required power flow computations for an IEEE 300-bus test system. The results showed that the proposed algorithm yields optimal solutions for the location and sizing of reactive power compensators, reducing the total system power losses while the voltage profiles are kept within adequate levels independently of the associated output power variations of the intermittent energy sources.*

**Keywords:** Renewable Energy, Capacitors, Power Flow, Particle Swarm Optimization (PSO).

## 1 Introducción

La búsqueda de formas alternativas de generación de energía, ha dado origen a las fuentes de energía renovables, siendo la energía eólica y la energía solar las implementadas con mayor frecuencia debido a su condición pro-ambiental y su alta capacidad de generación. Estas fuentes de energía presentan un comportamiento intermitente en la potencia generada, debido a que dependen de la naturaleza variable e impredecible de la velocidad del viento y la radiación solar. Este comportamiento intermitente puede ocasionar variaciones considerables en los flujos de potencia, ocasionando modificaciones en las variables eléctricas del sistema, las cuales pueden conducir a condiciones de operación inaceptables. Una forma de evitar que el sistema opere en condiciones inseguras es mediante la compensación reactiva a nivel local con la implementación de capacitores; sin embargo, la eficacia en el uso de compensación reactiva depende de gran manera del dimensionamiento y de la ubicación de los equipos en el sistema (González-Longatt, 2004). Existen diferentes métodos para ubicar y dimensionar de forma óptima los compensadores reactivos tales como el ensayo y error, análisis de sensibilidad y diversas técnicas de computación evolutivas (Gardel 2006, Hernández 2008). Entre las técnicas de computación evolutivas, destaca la Optimización por Enjambre de Partículas, o (PSO) por sus siglas en inglés, caracterizada por su versatilidad al poder ser ampliamente usada en distintos escenarios, y por su simple pero robusta formulación (Poli 2007). Por ejemplo, (Prakash y col., 2005) proponen la ubicación y dimensionamiento óptimo de capacitores en redes radiales de distribución basado en factores de sensibilidad de voltaje y PSO. Por su parte, el trabajo llevado a cabo por (Chen y col., 2015), demuestra que la técnica de PSO junto con la técnica de inferencia adaptiva difusa permite determinar en forma computacionalmente eficiente las decisiones de control de potencia reactiva y control de voltaje en redes de distribución con generación distribuida. Adicionalmente, (González 2010), propone el uso de la técnica de PSO para obtener el despacho económico de un sistema de potencia. Un trabajo similar al propuesto en el presente artículo, pero sin considerar incertidumbres asociadas a fuentes renovables es desarrollado por (Constante 2016).

En el presente artículo se propone una metodología basada en PSO para determinar la ubicación y dimensionamiento óptimo de capacitores (SVC), considerando la naturaleza intermitente de fuentes de energía solar y eólica, y las restricciones operativas del sistema, con el objetivo de disminuir las pérdidas de potencia activa y mejorar las condiciones de operación del sistema. Para la implementación del algoritmo propuesto, se hace uso de la herramienta computacional Matpower® (Zimmerman y col., 2015). Las incertidumbres asociadas a ambos tipos de generación son modeladas en detalle, y mediante la técnica de PSO se determinan la ubicación y dimensionamiento óptimo de capacitores conectados en paralelo.

## 2 Compensación Reactiva

En los sistemas de potencia es de gran importancia que se opere de forma eficiente y segura, una forma de lograr ello, es controlando el voltaje y la potencia reactiva, debido a que, mediante los mismos se pueden mantener los voltajes de todos los equipos del sistema dentro de los límites de operación, maximizar la utilización del sistema de transmisión, y reducir las pérdidas activas ( $I^2R$ ) y reactivas ( $I^2X$ ) a un mínimo práctico.

Los SVCs son generadores o cargas estáticas de potencia reactiva conectados en paralelo, donde su salida es variada por el control de parámetros específicos del sistema de potencia. Estos dispositivos son empleados en gran cantidad de ocasiones, debido a que presentan la habilidad de proveer un control rápido y continuo de la potencia reactiva y el voltaje, además de mejorar algunos aspectos en el desempeño de los sistemas de potencia (González y col., 2003).

## 3 Modelado de las Turbinas Eólicas

La velocidad del viento se modela en éste artículo usando una distribución de Weibull con parámetro de forma igual a 2, correspondiendo a la distribución de Rayleigh, siendo ésta la normalmente usada para el modelado estocástico del viento cuando se considera un periodo de planificación de largo o mediano plazo. En la figura 1, se muestra la distribución de Rayleigh usada para las turbinas eólicas (Becerra 2016).

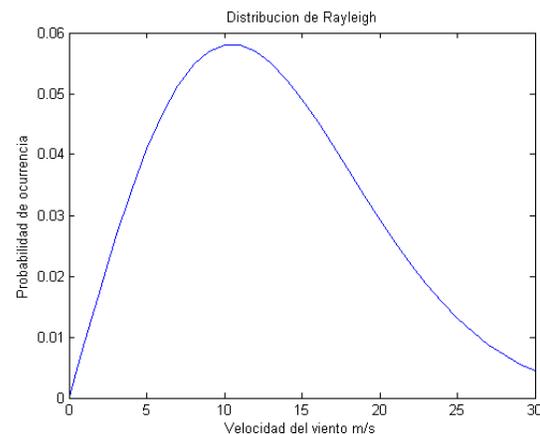


Fig. 1. Distribución Rayleigh para el Viento.

Una vez que se extrae la energía cinética que produce el viento al interactuar con las aspas del aerogenerador, la misma a través del rotor se transforma en potencia mecánica, y por medio de un generador se convierte en potencia eléctrica. Para el modelado del aerogenerador se utiliza el siguiente submodelo aerodinámico, el cual relaciona la velocidad del viento  $V_w$  con la potencia generada  $P_w$  (Quasching 2005):

$$P_w = \frac{\rho}{2} * \pi * \frac{D^2}{4} * C_p(\beta, \lambda) V_w^3 \quad (1)$$

En donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $D$  es el diámetro de las aspas del rotor,  $\beta$  es el ángulo de las aspas del rotor,  $\lambda$  es la relación de velocidad del rotor respecto a la velocidad del viento, y  $C_p$  es el coeficiente de desempeño, el cual tiene la siguiente relación para la turbina modelada (Becerra 2016):

$$C_p = 0,22 * \frac{116}{\lambda i} - 0,4\theta - 5e^{\frac{12,5}{\lambda i}} \quad (2)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{W_m * \frac{D}{2}}{V_w} \quad (3)$$

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\theta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1}} \quad (4)$$

Se establece como velocidad nominal de operación  $13,08$  m/s, por lo tanto,  $\lambda$  para la extracción de máxima potencia tiene un valor de  $6,3$ , tal y como se muestra en la figura 2 (Becerra 2016).

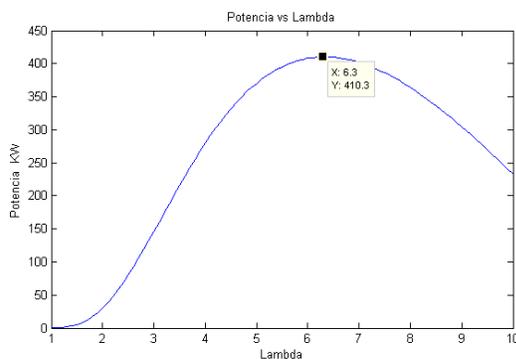


Fig. 2. Potencia generada vs coeficiente de desempeño.

La curva característica para la potencia generada en función de la velocidad del viento se muestra en la figura 3 (Becerra 2016). A partir de una velocidad del viento de  $35$  m/seg, el generador eólico se desconecta para evitar daños al mismo. Por debajo de  $4$  m/seg, la potencia generada también es nula.

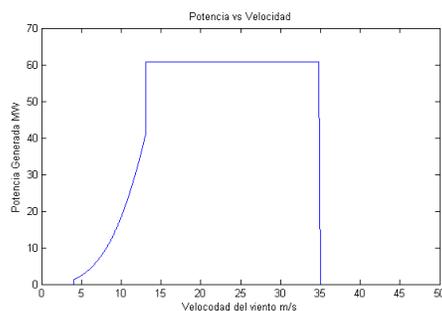


Fig. 3. Característica de Potencia vs Velocidad.

#### 4 Modelado del generador fotovoltaico

Para el modelado del comportamiento estocástico de la irradiancia solar, se usa una distribución de probabilidad uniforme para valores entre  $0$  y  $8000$   $W/m^2$ . Una vez la radiación solar incide en las celdas, estas generan corriente continua, la cual a través de un inversor se convierte en corriente alterna. Un histograma para  $16000$  muestras aleatorias de la distribución uniforme de la radiación se muestra en la figura 4 (Becerra 2016).

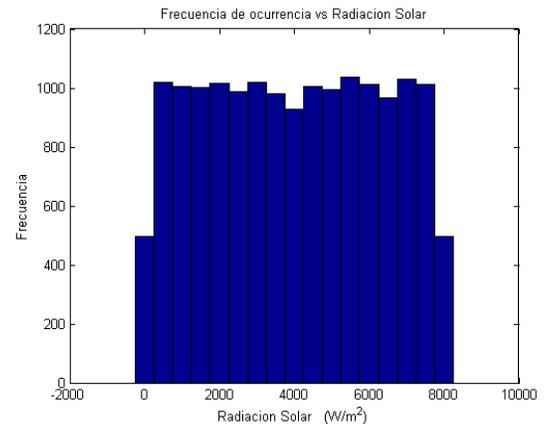


Fig. 4. Histograma para la radiación solar.

Para el modelado de la celda fotovoltaica se utiliza el circuito equivalente mostrado en la figura 5 (MathWorks 2016).

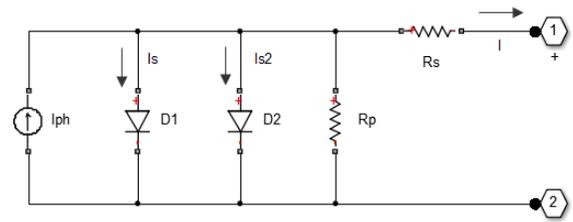


Fig. 5. Circuito equivalente de la celda fotovoltaica.

Por simplificación, se consideran la corriente de saturación del segundo diodo y la resistencia  $R_s$  nulos, además de una impedancia  $R_p$  infinita, resultando en la siguiente ecuación (MathWorks 2016):

$$I = I_{ph} - I_s * \left( e^{\frac{V+I*R_2}{N*V_i}} - 1 \right) \quad (5)$$

En donde la corriente solar inducida  $I_{ph}$  se calcula de la siguiente manera:

$$I_{ph} = I_{ph0} * \frac{I_r}{I_{r0}} \quad (6)$$

$I_r$  es la irradiancia en la celda,  $I_{r0}$  es la irradiancia base

( $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $I_{ph0}$  es la corriente inducida por una irradiancia  $I_{ro}$ ,  $I_s$  es la corriente de saturación del primer diodo,  $V_i$  es el voltaje térmico,  $N$  es el coeficiente de factor de calidad en el diodo 1, y  $V$  es el voltaje a lo largo de los puertos de la celda solar. La figura 6 muestra la curva característica de la celda solar para irradiancia constante y voltaje variable (Becerra 2016). A partir de esta curva, y mediante el uso de aproximación de curvas, se obtiene la potencia generada  $P_{gen}$  en función de la radiación solar  $I_{rra}$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{gen} = 0,04046 * I_{rra} - 6,365 \quad (7)$$

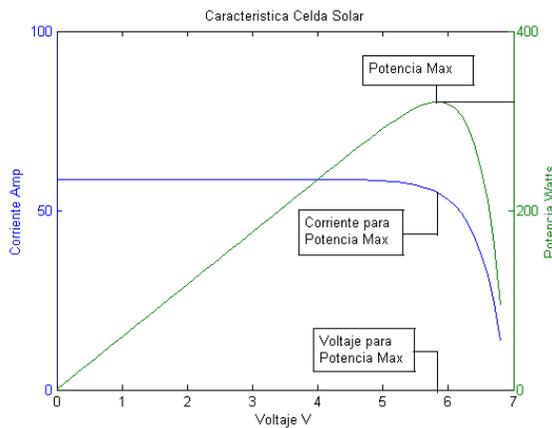


Fig. 6. Curva característica de la celda solar.

#### 4 Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

La Optimización por Enjambre de Partículas (PSO Particle Swarm Optimization) es una técnica de optimización desarrollada por Kennedy y Eberhart en 1995, la cual fue inspirada para elaborar modelos de conductas sociales, como el movimiento de las aves o bancos de peces (Pedersen y col., 2010).

La PSO es una técnica de computación evolutiva, utilizada en la solución de múltiples problemas en las áreas de optimización combinatoria, debido a que su funcionamiento se basa en un mecanismo análogo a los procesos de la evolución y del comportamiento natural de los seres vivos, por ejemplo, el comportamiento de las abejas al momento de buscar alimento. La metodología usada por las técnicas de computación evolutiva, se basan en el uso de mecanismos de selección de las mejores soluciones, las cuales según sus características son combinadas para obtener nuevas soluciones, estas soluciones se evalúan mediante una función objetivo.

Una partícula representa una solución individual en el espacio  $n$ -dimensional de búsqueda, la cual se mueve por todo el espacio donde se encuentra definido el problema. En el algoritmo de la PSO, cada partícula tiene asociada una posición y una velocidad, las cuales son representadas como vectores  $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$  y  $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{in})$  respectivamente. Del mismo modo, cada partícula conoce su mejor posición

$P_{best_i} = (x_{i1}^{P_{best_i}}, \dots, x_{in}^{P_{best_i}})$  y la mejor posición de sus vecinos  $G_{best_i} = (x_{i1}^{G_{best_i}}, \dots, x_{in}^{G_{best_i}})$ .

La velocidad de cada partícula se modifica de la siguiente manera (Pedersen y col., 2010):

$$V_i^{k-1} = \omega V_i^k + \varphi_1 rand_1 (P_{best_i}^k - X_i^k) + \varphi_2 rand_2 (G_{best_i}^k - X_i^k) \quad (8)$$

En donde  $V_i^k$  es la velocidad de cada partícula en la iteración  $k$ ,  $\omega$  es el coeficiente de inercia,  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  son constantes de aceleración,  $rand_1$  y  $rand_2$  son dos números aleatorios uniformemente distribuidos con un rango de  $[0.0-1.0]$ ,  $X_i^k$  es la posición de cada partícula en la iteración  $k$ ,  $P_{best_i}^k$  es la mejor posición conocida por la partícula hasta la iteración  $k$  y  $G_{best_i}^k$  es la mejor posición conocida por todo el enjambre hasta la iteración  $k$ .

Por su parte, una vez conocida la nueva velocidad de la partícula, ésta se mueve desde su posición actual hasta la próxima posición mediante la siguiente ecuación:

$$X_i^{k-1} = X_i^k + V_i^{k-1} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta la actualización de la velocidad y la actualización de la posición de una partícula, el siguiente procedimiento puede ser implementado para el algoritmo de la PSO:

- Inicializar el enjambre asignándole una posición aleatoria dentro del espacio del problema a cada partícula, teniendo en cuenta las limitaciones.
- Actualizar la velocidad y la posición de cada partícula cuando cumplan con las limitaciones.
- Actualizar la mejor posición de cada partícula y la mejor posición de todo el enjambre mediante la evaluación de la función objetivo.
- Repetir el procedimiento desde el segundo paso, hasta que se cumplan los criterios de parada definidos.

En esta investigación la función objetivo a minimizar representa los costos totales del sistema, esta función se describe de la siguiente forma:

$$costo = \alpha * P_{activas} + \beta * \sum_{i=1}^n Q_{capi} \quad (10)$$

Dónde  $\alpha$  representa el parámetro de costo por pérdidas activas ( $\$/MW$ ),  $P_{activas}$  son las pérdidas activas totales del sistema ( $MW$ ),  $\beta$  es el parámetro de costo por compensación reactiva ( $\$/MVar$ ) y  $\sum_{i=1}^n Q_{capi}$  representa la sumatoria de la compensación reactiva aplicada a cada barra del sistema.

#### 5 Matpower®

Matpower® es un paquete de extensión de Matlab®, creado para resolver problemas de flujo de carga y optimización, es una herramienta de simulación que contiene estructuras precargadas de sistemas de potencia basadas en



mulaciones no se ha considerado las variaciones propias de la carga.

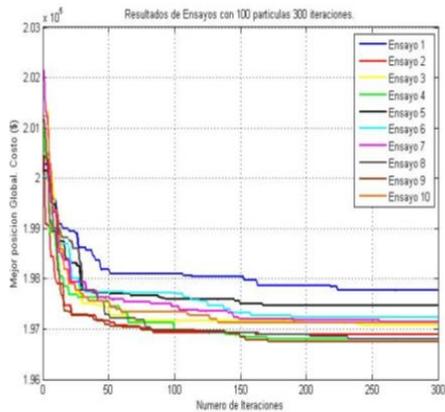


Fig. 8. Convergencia del enjambre al costo mínimo.

Tabla 1: Resultados de la PSO.

Ensayo	Pactiva (MW)	$\Sigma Q_{cap}$ (MVAR)	Costo (\$)
1	384,5415	3669	197.774
2	381,2769	4173	196.898
3	381,0549	4358	197.064
4	383,1763	3471	196.795
5	384,0052	3643	197.467
6	383,8862	3521	197.225
7	382,8257	3822	197.146
8	381,8310	3922	196.798
9	382,5947	3632	196.745
10	382,6426	3866	197.120

En la figura 9 se muestra la compensación reactiva requerida por la barra 5, en donde se puede observar el valor de compensación que presenta mayor frecuencia de ocurrencia, con lo cual se deben ajustar los dispositivos de compensación para este respectivo valor para obtener la solución óptima. Gráficos de probabilidad similares fueron obtenidos para las barras que requirieron de mayor compensación.

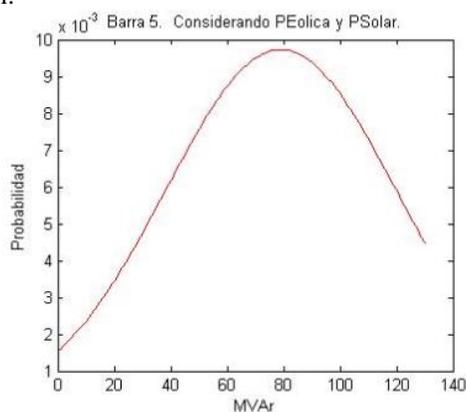


Fig. 9. Distribución de probabilidad de la potencia reactiva compensada en la barra 5

## 8 Conclusiones

El uso de la técnica de PSO para encontrar la ubicación y dimensionamiento óptimo de SVCs en los sistemas de potencia proporciona soluciones óptimas, ya que permite disminuir de forma considerable las pérdidas de potencia activa en un sistema de potencia de dimensiones realistas, manteniendo condiciones de operación aceptables, para condiciones de operación variables debido a la presencia de fuentes intermitentes de energía.

Mediante la aplicación del algoritmo propuesto, se puede determinar los rangos de operación óptimos de los SVC, además de su ubicación.

Es importante hacer notar que la precisión y eficiencia de los resultados obtenidos dependen de los parámetros establecidos para el algoritmo de la PSO, los cuales se ajustan dependiendo de las características del sistema en estudio.

## Referencias

- Becerra D, 2016, Flujo de Carga Óptimo con Restricciones de Seguridad y Fuentes intermitentes de Energía. Trabajo de Grado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Chen S, Hu W, Su C, Zhang X, Chen Z, 2015, Optimal reactive power and voltage control in distribution networks with distributed generators by fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimisation method, IET Generation, Transmission & Distribution.
- Christie R, 1993, 300 Bus Power Flow Test Case. Disponible en: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf300/pg-tca300bus.html>. Fecha de consulta: 25 de Julio, 2016.
- Constante S, 2016, Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de Compensación Reactiva utilizando Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). Trabajo de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Gardel P, 2006, Compensación de Potencia Reactiva en un Contexto Multiobjetivo Mediante Algoritmo de Colonia de Hormigas. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Asunción. Asunción, Paraguay.
- González-Longatt, FM, 2004, Introducción al Control de Q-V Potencia Reactiva Voltaje. Maracay, Venezuela.
- González CJC, Pidre JC, 2003, Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC).
- González E, 2010, Despacho Económico en Sistemas de Potencia Usando Optimización por Enjambre de Partículas. Trabajo de Grado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Hernández M, 2008, Aplicación de Algoritmos Genéticos para la Localización Óptima de Capacitores en Redes de Distribución. Trabajo de Grado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- MathWorks, 2015, Matlab help, Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/>. Fecha de consulta: 27 de Noviembre, 2015.

Pedersen MEH, Chipperfield AJ, 2010, Simplifying Particle Swarm Optimization, Applied Soft Computing.  
Poli R, 2007, An Analysis of Publications on Particle Swarm Optimization Applications. Department of Computer Science, University of Essex. Essex, UK.  
Prakash K, Sydulu M, 2007, Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL.  
Quasching V, 2005, Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan, London, Sterling, VA.  
Zimmerman R, Murillo-Sanchez C, 2015, Matpower 5.1. Users Manual. Power Systems Engineering Research Center (Pserc).

**Recibido:** 15 de febrero de 2017

**Aceptado:** 01 de agosto de 2017

**Castillo, William:** Ingeniero Electricista, 2016, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: [williamcastillo747@gmail.com](mailto:williamcastillo747@gmail.com)

**Muñoz, Juan C.:** Ph.D. en Ingeniería Eléctrica y de Computación, University of Waterloo, 2013.

**Hernández, Jean C:** Ph.D. en Ingeniería Eléctrica. Correo electrónico: [jean77@gmail.com](mailto:jean77@gmail.com).

**Dávila, Marisol:** Dr. en ciencias en la especialidad de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y Estudio de Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Guadalupe, México. Correo electrónico: [mari-sol.davila@gmail.com](mailto:mari-sol.davila@gmail.com).

**Ballester, Lelis N.:** MSc. en Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad de Los Andes, 2014, Correo electrónico: [lnelson27@gmail.com](mailto:lnelson27@gmail.com)

