

# Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas

## Parameter estimation of an exponential recovery load model using metaheuristic techniques

Luis Fernando Rodríguez García<sup>1\*</sup>, Sandra Milena Pérez Londoño<sup>2</sup>, Juan José Mora Flórez<sup>3</sup>  
<sup>1, 2, 3</sup> *Docente Programa de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia*  
 luferodriguez@utp.edu.co  
 saperez@utp.edu.co  
 jjmora@utp.edu.co

**Resumen**— En este artículo se presenta la aplicación de una metodología para la obtención de los parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial, empleando mediciones del sistema de potencia. La estimación de los parámetros se plantea como un problema de optimización, el cual se resuelve con la técnica de enjambre de partículas. La validez de la propuesta fue realizada sobre un sistema de potencia de prueba, en el cual se representó el comportamiento de una carga compuesta ante variaciones en la tensión del barraje. Los resultados muestran que la metodología propuesta permite obtener un modelo de carga que se ajusta adecuadamente a las perturbaciones analizadas.

**Palabras clave**— Modelado de carga, sistema eléctrico de potencia, estimación de parámetros, optimización por enjambre de partículas.

**Abstract**— In this paper, the application of a methodology for parameter estimation of a measurement-based exponential recovery load model is described. An optimization problem is proposed for parameter estimation of the load model, and particle swarm optimization is used for its solution. The proposed methodology was tested on a power system, where load was represented by a composite load, which is affected by bus voltage variations. Based on the results, a suitable load model for the analyzed disturbances is obtained using the proposed methodology.

**Key Word**—Load modeling, electric power system, parameter estimation, Particle Swarm Optimization.

## I. INTRODUCCIÓN

En el análisis y operación de un sistema eléctrico de potencia (SEP), es de suma importancia disponer de modelos de cada uno de sus componentes. A diferencia de otros elementos como los generadores, líneas de transmisión, o dispositivos de compensación que presentan

modelos ampliamente estudiados y aceptados, en el caso de las cargas no ocurre lo mismo. Esto se debe principalmente a que las cargas presentan un comportamiento estocástico y altamente variable con el tiempo, lo que dificulta definir su modelado a partir de estructuras fijas [1].

La influencia que tiene el modelo de la carga sobre el análisis, simulación y operación de un SEP, ha sido ampliamente reportada en los artículos técnicos. Áreas como la estabilidad de tensión [2] y la estimación de estados [3] (por mencionar algunas), presentan una gran afectación con el tipo de modelo de carga que se utiliza, así como por la exactitud y calidad de los parámetros empleados.

Por otra parte, existe una gran dependencia entre el modelo que se emplea y el tipo de estudio que se realiza. Mientras que para algunos estudios (como flujo de potencia) basta con una representación estática de la carga, estudios como los de estabilidad de sistemas eléctricos requieren del modelado de las características dinámicas de la carga, con el fin de mejorar la precisión de los estudios [4] [5]. En algunos sistemas eléctricos alrededor del mundo, han ocurrido eventos que no se han podido reproducir debido a las imprecisiones de los modelos de carga y esto ha impedido a los operadores de red, analizar las causas de dichas contingencias [6]. Situaciones como estas son las que han motivado a los analistas de SEP, a invertir esfuerzos y recursos para mejorar los modelos de representación de cargas conectadas [7].

En la actualidad, la existencia de diferentes unidades de monitoreo a lo largo del sistema de potencia, facilita la obtención de medidas del comportamiento transitorio. Estas medidas pueden ser eventualmente empleadas para diferentes análisis en los sistemas eléctricos, entre los cuales está el modelado de carga [8]. Las diferentes investigaciones presentadas y disponibles en las bases de datos en los últimos años se enfocan en la determinación de los modelos de carga a

partir de dos enfoques. Un enfoque se basa en la recolección de la información sobre el tipo y la composición de la carga conectada a un barraje, que se conoce como *modelado basado en componentes*. Un enfoque alternativo se basa en la utilización de mediciones registradas a lo largo del sistema de potencia, para que a través de un proceso de ajuste de parámetros, se desarrolle el modelo de carga correspondiente, el cual se conoce como *modelado basado en mediciones* [4].

En este artículo se presentan los resultados obtenidos al implementar una metodología de estimación de parámetros utilizando el modelo de carga de recuperación exponencial, basado en mediciones. Inicialmente en la sección II, se presentan las definiciones básicas de los tipos de modelos de carga y su clasificación utilizadas en la investigación. Posteriormente en la sección III, se presenta un breve estado del arte respecto a las metodologías más recientes, empleadas en el enfoque basado en mediciones. En la sección IV y V, se describe la metodología empleada en la obtención de los parámetros del modelo de carga y la aplicación sobre un SEP de prueba, respectivamente. Finalmente en la sección VI se presentan las observaciones y conclusiones de la implementación de la metodología.

## II. MODELOS DE CARGA Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA

Un elemento de carga se puede definir como un dispositivo o componente conectado al sistema, que consume, genera o controla potencia activa o reactiva y que se puede afectar por variaciones de tensión del tipo transitorias, dinámicas o de estado estacionario [9]. Un modelo de carga es la representación matemática de la potencia activa y reactiva consumida por los elementos de carga, en función de las variables que afectan esta respuesta. Dichas variables son las tensiones en los barrajes y la frecuencia de la red [4].

Es importante notar que un modelo de carga utilizado en un SEP, generalmente representa de manera agregada, los elementos conectados a un barraje, dada la imposibilidad de conocer la composición exacta de los elementos conectados a este (motores, lámparas de descarga, sistemas de calefacción, dispositivos electrónicos, cargas termostáticamente controladas, entre otros). Incluso si se conociera su composición exacta, no sería práctico representar cada uno de estos elementos de forma individual para posteriores análisis en herramientas computacionales, por lo que es necesaria su simplificación [10].

Los modelos de carga se pueden clasificar por sus características estáticas y dinámicas [10]. A partir de este criterio, se presenta una clasificación de los modelos de carga en sistemas de potencia.

### 1. Modelos estáticos de carga

Los modelos estáticos de carga expresan las características de las cargas en cualquier instante de tiempo como funciones algebraicas de la magnitud de la tensión en un barraje y la frecuencia. Generalmente, las componentes de potencia activa y reactiva se consideran separadas (no presentan correlación). Típicamente, se utilizan dos estructuras:

#### 1.1. Modelo exponencial

En este modelo, la potencia activa y reactiva consumida por la carga se representa como se muestra en (1) y (2), respectivamente:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2)$$

Donde  $P_0$  y  $Q_0$  son las potencias nominales activa y reactiva,  $V_0$  es la tensión nominal del barraje, y  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la carga exponencial. Estos parámetros varían con los elementos que se encuentran conectados al barraje. Algunos casos particulares se tienen cuando  $\alpha, \beta = 0, 1, 2$ , que corresponden a los casos de cargas tipo potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente. Igualmente, es posible incluir el efecto de la frecuencia sobre el modelo estático, como se presenta en (3) y (4).

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (4)$$

En este caso, las potencias activas y reactivas pueden cambiar ante variaciones en la frecuencia. La tabla 1 muestra los valores característicos para algunas cargas típicas en los sistemas eléctricos.

Tipo de carga	$\alpha$	$\beta$	$K_{pf}$	$K_{qf}$
Lámpara incandescente	1.6	0	0	0
Lámpara fluorescente	1	3	1	-2.8
Lámpara de mercurio	2.5	2.2	-	-
Aire acondicionado	0.3	1.8	0.1	-1.6
Refrigerador	0.8	2.5	0.5	-1.4
Televisor	2	3.3	0	-2.6
Calentador resistivo	2	0	0	0

Tabla 1. Valores de los exponentes para algunas cargas típicas [4].

#### 1.2. Modelo polinomial (ZIP)

Este modelo representa la carga como una combinación de una carga de potencia constante, una carga de corriente constante y

una carga de impedancia constante, como se muestra en (5) y (6).

$$P = P_0 \left( a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (5)$$

$$Q = Q_0 \left( b_0 + b_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (6)$$

Donde  $P_0$  y  $Q_0$  son las potencias nominales activa y reactiva,  $V_0$  es la tensión nominal del barraje,  $a_0, a_1, a_2$  son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia constante para la potencia activa, respectivamente, y  $b_0, b_1, b_2$  son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia constante para la potencia reactiva, respectivamente. De manera similar al modelo exponencial, en este modelo se puede incluir la dependencia de la frecuencia.

Los coeficientes deben satisfacer la condición dada por (7):

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 + a_2 &= 1 \\ b_0 + b_1 + b_2 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Al igual que para el modelo exponencial, los valores de los parámetros del modelo varían según la composición de la carga conectada en el barraje.

## 2. Modelos dinámicos de carga

En estos modelos, a diferencia de los modelos estáticos, la potencia activa y reactiva consumida por la carga depende de los valores de las tensiones en el tiempo, por lo tanto, su modelado se realiza a partir de ecuaciones diferenciales, o de ecuaciones en diferencia, para el caso del tiempo discreto. En este caso, puede existir o no correlación entre la potencia activa y la potencia reactiva.

Algunas estructuras para el modelado dinámico de cargas se presentan a continuación:

### 2.1. Modelos autorregresivos de media móvil [11]

Son modelos en los que las potencias en algún instante de tiempo, se pueden calcular como una función de los valores de las potencias, tensiones y frecuencias de instantes de tiempo anteriores. Matemáticamente, se pueden formular como se muestra en (8).

$$\begin{aligned} P(t) = & - \sum_{i=1}^{n_a} a_i P(t-i) + \sum_{j_1=0}^{n_{b1}} b_{1j_1} V(t-j_1-n_{k1}) \\ & + \sum_{j_2=0}^{n_{b2}} b_{2j_2} f(t-j_2-n_{k2}) + \sum_{k=0}^{n_c} c_k e(t-k) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q(t) = & - \sum_{i=1}^{n_a} a_i Q(t-i) + \sum_{j_1=0}^{n_{b1}} b_{1j_1} V(t-j_1-n_{k1}) \\ & + \sum_{j_2=0}^{n_{b2}} b_{2j_2} f(t-j_2-n_{k2}) + \sum_{k=0}^{n_c} c_k e(t-k) \end{aligned} \quad (9)$$

Donde  $n_a, n_a, n_{b1}$  y  $n_c$  son los órdenes de cada modelo de regresión, y  $a_i, b_{1j_1}, b_{2j_2}$ , y  $c_k$  son los correspondientes coeficientes del polinomio.

En este tipo de modelos, se asume como práctica general que las potencias activa y reactiva son cantidades desacopladas, y por tanto, cada una de ellas puede ser expresada separadamente como una función de la tensión de carga y las variaciones en la frecuencia.

### 2.2. Modelo de recuperación exponencial

Este modelo fue desarrollado por [12] a partir de experimentación, y se fundamenta en el hecho de que ante una variación del tipo escalón unitario en la tensión, la potencia activa y reactiva consumida por la carga tiene una respuesta de tipo exponencial. Este comportamiento se modela a partir de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden de acuerdo a (9):

$$\begin{aligned} T_p \frac{dx_p}{dt} &= -x_p + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \\ P_d &= x_p + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \\ T_q \frac{dx_q}{dt} &= -x_q + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \\ Q_d &= x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $x_p, x_q$  son variables de estado asociadas a la potencia activa y reactiva,  $P_0, Q_0$  son las potencias activa y reactiva nominales consumidas por la carga,  $N_{ps}, N_{qs}$  son exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga, y  $N_{pt}, N_{qt}$  son exponentes asociados a la respuesta transitoria de la carga, y  $T_p, T_q$  son constantes de tiempo asociadas a los tiempos de recuperación de la respuesta exponencial.

### 2.3. Modelo compuesto de carga

A diferencia de los modelos dinámicos mostrados previamente, el modelo compuesto de carga pretende dar una interpretación física de los parámetros que se obtienen en el modelo. Es por esto que en su formulación, se considera una combinación de una carga estática polinomial (ZIP) con una carga tipo motor de inducción. Mediante esta representación, se busca representar los elementos estáticos de la red, así como el comportamiento

dinámico de las cargas. La motivación de emplear un motor de inducción para la representación dinámica es por el elevado número de cargas de este tipo, que se encuentran conectadas a los barrajes de los sistemas, las cuales representan un porcentaje significativo de la potencia total consumida en el barraje. Este modelo fue propuesto inicialmente en [13].

La representación del modelo compuesto se realiza mediante un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales según (11) y (12), donde se emplea un modelo de tercer orden para el motor de inducción.

$$\begin{aligned} \frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)]$$

$$I_d = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)]$$

$$I_q = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)]$$

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r} \quad (12)$$

$$X = X_s + X_m$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$$

$$A + B + C = 1$$

Donde  $R_s$  es la resistencia del estator,  $X_s$  es la reactancia del estator,  $X_m$  es la reactancia de magnetización,  $R_r$  es la resistencia del rotor,  $X_r$  es la reactancia del rotor,  $H$  es la constante de inercia del rotor,  $E'_d$  es la tensión interna de eje directo,  $E'_q$  es la tensión interna de eje cuadratura,  $\omega$  es la velocidad de la máquina,  $T_0$  es el torque de carga en estado estacionario, y  $A$ ,  $B$ ,  $C$  son los coeficientes del torque de carga. Con el fin de acoplar el modelo estático con el modelo dinámico, se introduce el parámetro  $K_{pm}$  dado en (13):

$$K_{pm} = \frac{P_{motor}}{P_0} \quad (13)$$

Este parámetro relaciona la potencia consumida por el motor de inducción con la potencia total consumida por la carga compuesta. Por tanto se debe satisfacer las relaciones dadas en (14):

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 + a_2 &= 1 - K_{pm} \\ b_0 + b_1 + b_2 &= 1 - Q_{motor}/Q_0 \end{aligned} \quad (14)$$

Un modelo de carga como el modelo compuesto generalmente se emplea en la representación de todo un sistema de distribución. Esto hace que el efecto de las impedancias de las líneas de la red de distribución sea contenido en los elementos del modelo de carga.

### III. MODELADO DE CARGA BASADO EN MEDICIONES: UNA REVISIÓN

Como ya se había mencionado en la introducción, para la obtención de los modelos de carga se utilizan dos enfoques: Uno basado en componentes y otro basado en mediciones.

El modelado de carga basado en mediciones, aprovecha la información obtenida de las unidades de monitoreo en los sistemas eléctricos, acerca de las variaciones de potencia activa y reactiva, ante cambios en el nivel de la tensión y/o frecuencia en una o varias barras específicas. Estas variaciones pueden ser el resultado de condiciones normales de operación o el resultado de perturbaciones intencionales o no intencionales sobre el sistema.

Consta fundamentalmente de un procedimiento a dos pasos, en donde inicialmente se define una estructura de un modelo, y posteriormente, mediante un proceso de ajuste de parámetros, se determinan los que mejor se ajustan a las mediciones obtenidas. En la Figura 1, se ilustra un esquema básico del proceso de obtención del modelo de carga, empleando mediciones sobre el sistema.

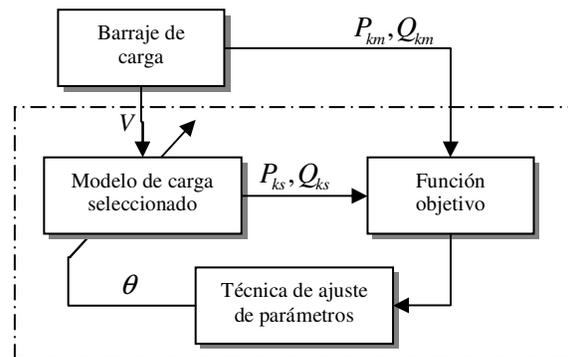


Figura 1. Esquema general del proceso.

Donde la selección del modelo de carga depende del conocimiento previo aproximado que se tenga sobre la composición de la carga.  $V$  es la variable de control sobre la carga,  $P_{km}$  y  $Q_{km}$  son las mediciones de potencia activa y reactiva respectivamente,  $P_{ks}$  y  $Q_{ks}$  son los valores de potencia activa y reactiva simulados y finalmente  $\theta$  es el vector de los parámetros del modelo de carga estimados, que son ajustados por una técnica específica.

Durante los últimos años, han sido muchas las investigaciones que presentan diversas metodologías basadas en mediciones,

para el desarrollo de modelos de carga en sistemas eléctricos de potencia. A continuación se reseñan las más recientes metodologías encontradas para la estimación de parámetros del modelo de carga.

Las variaciones de la señal de entrada al modelo, que según la figura 1, corresponden a la señal de tensión en la barra de carga, se pueden obtener realizando perturbaciones sobre ella, a través por ejemplo de la conmutación de los *taps* del transformador o de elementos de compensación como condensadores. En [14] justifica que dichas perturbaciones pueden afectar al usuario final y propone estimar los parámetros de un modelo de carga del tipo recuperación exponencial, sólo a partir de mediciones recopiladas durante la operación normal del sistema. La metodología se validó con mediciones reales del sistema eléctrico de Suecia, y busca ser aplicada para mejorar el dimensionamiento de los límites de transferencia y estabilidad del sistema.

Por su parte, otros autores como [15] utilizan los registros de perturbaciones que ocurren o son provocadas en el sistema, para identificar el modelo compuesto de carga, empleando diversas pruebas de validación que se encuentran reportadas en la literatura. Para la obtención de modelos de sistemas de prueba a gran escala se encuentran [16] [17] [18].

Con respecto al proceso de ajuste de parámetros sobresale el uso de técnicas de optimización, que generalmente emplean técnicas metaheurísticas que buscan minimizar la diferencia entre los valores medidos y los valores calculados por el modelo. Tal es el caso de [19] donde se desarrolla una metodología para la estimación de parámetros de un modelo de recuperación exponencial, que combina la técnica metaheurística de recocido simulado para la minimización de una función de mínimos cuadrados, junto con técnica *Cramer-Ráo Lower Bound* para determinar la varianza de las estimaciones. Los autores realizan además la estimación, considerando una linealización del modelo y concluyen que la utilización de este último, presenta resultados bajos en precisión, en comparación cuando utilizan el modelo no lineal.

Por otra parte, en [20] se utiliza el método de mínimos cuadrados para la obtención de modelos de carga del tipo recuperación exponencial y linealizaciones de este. La validación de los resultados se realizó con la técnica de validación cruzada con datos del sistema eléctrico de Taiwán. Debido al comportamiento variante de la carga, los autores resaltan la necesidad de actualizar continuamente los parámetros del modelo de carga, con el fin de tener una correcta caracterización de esta.

Las técnicas híbridas se destacan por presentar buenos resultados en el proceso de estimación de parámetros del modelo compuesto, tal es el caso de [21] donde se emplea una combinación de algoritmos genéticos con el método de

programación no lineal de Levenberg–Marquardt. El objetivo de esta combinación es aprovechar las ventajas de búsqueda global de los algoritmos genéticos, para evitar que la respuesta alcance óptimos locales, con la precisión del método de Levenberg–Marquardt, que se usa para refinar la respuesta alcanzada por el algoritmo genético. La estimación de los parámetros del modelo compuesto fue satisfactoria, con una buena capacidad de generalización, aunque señalan que este procedimiento requiere de un monitoreo permanente del sistema, con el fin de obtener mediciones adecuadas para el cálculo del modelo.

En [22] se aplica una técnica novedosa para la estimación de los parámetros, denominada *Trust Tech*, que tiene la ventaja de solucionar el problema de las posibles múltiples soluciones locales que pueden presentar otras metodologías

Buscando reducir el esfuerzo computacional para la implementación de la metodología basada en mediciones en sistemas más grandes, [23] presentan una alternativa que emplea vectores de soporte de las bases de datos medidas, lo que permite obtener el modelo a partir de un subconjunto de la base de datos completa, con una buena capacidad de generalización y con menor tiempo computacional. Posteriormente en [24] se presenta un análisis detallado sobre la capacidad de identificar los parámetros del modelo de carga compuesto, con el fin de analizar la posibilidad de reducir el número de parámetros a estimar. Mediante el uso del análisis de sensibilidad de trayectorias, los autores mostraron que sólo es necesario determinar algunos de los parámetros, que son los más sensibles, mientras que los demás parámetros pueden ser ajustados a valores fijos.

También como una medida para reducir el tiempo y esfuerzo computacional en la determinación del modelo de carga, se presenta en [25] una técnica de separación de los parámetros del modelo no lineal, lo cual facilita el proceso de identificación y consigue que el algoritmo determine de manera precisa los parámetros del modelo de carga agregada.

Otras propuestas como [26] han empleado técnicas de aprendizaje no supervisado para reducir el esfuerzo computacional. Allí, después de un proceso de agrupamiento, se obtiene sólo un modelo de carga para los centroides resultantes, quienes son los elementos representativos de un conjunto de barras con características similares. Esto permite mejorar la capacidad de generalización del modelo desarrollado.

En cuanto a la selección del modelo de carga, algunos autores como [27] proponen un modelo que representa la impedancia de las líneas de la red de distribución de manera explícita. Este modelo se conoce como “*synthesis load model*”. Para la obtención de sus parámetros se encuentran [28] [29], quienes validaron su modelo mediante la utilización de datos reales obtenidos sobre el sistema.

En el refinamiento del modelo de carga que se utiliza, también se puede emplear información estadística [30], así como también el uso de datos de curvas de carga [31]. La combinación de la

información estadística que se tenga sobre la composición de la carga, permite definir una estructura de modelo que combinada adecuadamente con las mediciones, permite determinar los parámetros del modelo seleccionado.

Finalmente, en cuanto a los modelos autorregresivos de media móvil, [11] propone el desarrollo de modelos de carga dinámicos empleando representaciones con series de tiempo autorregresivas de media móvil con variable exógena, con el fin de predecir el comportamiento de la carga. Posteriormente, [32] estudia el efecto de la normalización de los datos en el desempeño del modelo ARMAX, empleando los datos obtenidos de la respuesta de la carga ante un evento transitorio. La respuesta del modelo es más robusta cuando se consideran datos normalizados en lugar de datos absolutos.

#### IV. METODOLOGÍA

Como se mencionó previamente, el modelado de carga basado en mediciones es un procedimiento que consta principalmente de dos pasos, y en el cual se requiere un conjunto de mediciones de tensión y potencia consumida en los barrajes de carga bajo análisis. Es recomendable que el conjunto de mediciones permita observar el comportamiento dinámico de la carga, esto es, que la información que se recopile sobre la carga corresponda a la respuesta tanto a perturbaciones controladas de la operación (conmutación de *taps* de transformadores) o no controladas como eventos transitorios sobre el sistema de potencia (fallas).

##### 1.1. Selección de la estructura de modelo

La estructura del modelo define la relación matemática entre las variables de entrada del modelo de carga (magnitud de tensiones y/o ángulos en los barrajes) con las variables de salida del mismo (potencia activa y reactiva consumida por la carga). El conocimiento previo que se tenga sobre el comportamiento de la carga es útil para la selección de la estructura más adecuada que refleje el comportamiento de esta. Para propósitos de modelado dinámico de la carga, la estructura del modelo se plantea en términos de ecuaciones diferenciales.

Se ha documentado que el comportamiento de la carga ante pequeñas perturbaciones en la tensión (del tipo escalón), corresponde a una respuesta de forma exponencial de la potencia consumida por la carga. Por esta razón, se utiliza en este artículo, un modelo de recuperación exponencial como estructura de modelo.

##### 1.2. Estimación de parámetros

Es el procedimiento mediante el cual se determina el conjunto de parámetros que mejor ajusta la respuesta de un modelo a un conjunto de mediciones. La estimación de

parámetros se puede plantear a partir de un proceso de optimización, que busca minimizar la diferencia entre los valores medidos desde el sistema de potencia con los valores simulados por el modelo de carga. Para esto, se emplea la función objetivo de mínimos cuadrados, que se muestra en (15):

$$\min \sum_k \left[ (P_{km} - P_{ks}(\theta))^2 + (Q_{km} - Q_{ks}(\theta))^2 \right] / N \quad (15)$$

Donde  $N$  es el número total de muestras.

Se pueden emplear diferentes técnicas de optimización matemática para la solución del problema, que van desde técnicas exactas, hasta las técnicas heurísticas y meta-heurísticas. La aplicación de éstas últimas ha sido de creciente interés en investigaciones recientes, por el hecho de encontrar soluciones de buena calidad en tiempos computacionales moderados. A pesar de que ninguna de las meta-heurísticas es mejor que las demás, algunas presentan propiedades interesantes que pueden ser explotadas en aplicaciones específicas. Para propósitos de este artículo, se utiliza la técnica meta-heurística de optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*, por sus siglas en inglés).

##### 1.3. Optimización por enjambre de partículas

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas se basa en el comportamiento de los bancos de aves y peces, y que puede ser aplicado en problemas de asignación de tareas [33].

Se inicia con una población de individuos, denominados partículas, que se distribuyen en el espacio de soluciones, las cuales se desplazan a partir del conocimiento de las mejores soluciones encontradas por cada conjunto. El algoritmo consta de los siguientes pasos:

**Inicializar:** Definir el número de partículas, límites máximos y mínimos de las posiciones y las velocidades.

**Paso 1:** Generar un conjunto inicial de partículas y velocidades.

**Paso 2:** Evaluar la función de adaptación del conjunto inicial de partículas, e inicializar mejor posición de cada partícula, y mejor posición del enjambre.

**Paso 3:** Desplazar las partículas empleando las velocidades iniciales.

**Paso 4:** Evaluar la función de adaptación en la posición actual. Si una partícula encuentra un valor de función de adaptación mejor que su mejor valor hasta el momento, se almacena en la partícula la nueva posición encontrada. Si el enjambre encuentra un valor de función de adaptación mejor que el mejor valor encontrado por el enjambre, se actualiza el incumbente.

**Paso 5:** Calcular un nuevo conjunto de velocidades. Desplazar las partículas usando estas velocidades.

**Paso 6:** Verificar el criterio de parada. Si el criterio de parada se satisface, se detiene el proceso. En caso contrario, regresar al paso 4.

Los criterios de parada para el algoritmo pueden ser el número máximo de iteraciones, o una tolerancia mínima para la función de adaptación.

### V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar la validez del método propuesto, se llevan a cabo simulaciones sobre un sistema eléctrico de prueba, empleando el software NEPLAN [34].

El sistema utilizado presentado en la Figura 2, consta de cuatro barrajes, de los cuales uno de ellos corresponde a un barraje infinito. El barraje infinito se conecta a un transformador para reducir la tensión de 400kV a 115kV, donde dos líneas de transmisión en paralelo se conectan hasta otro transformador, que reduce la tensión de 115kV a 400V para alimentar la carga.

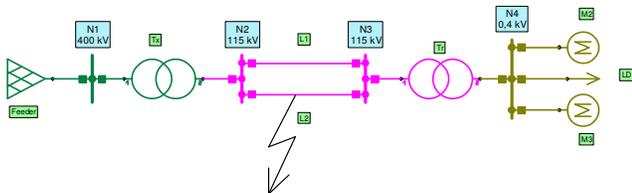


Figura 2. Sistema de prueba.

Se recopilan datos de la respuesta de la tensión y de la potencia activa y reactiva de la carga, ante la variación del tap del transformador Tr de la Figura 2.

Las mediciones de tensión, potencia activa y reactiva que se obtuvieron del sistema, ante las conmutaciones realizadas, se presentan en las Figuras 3 y 4, respectivamente:

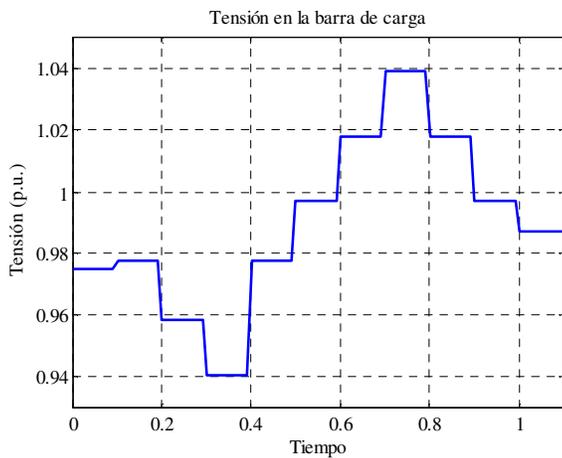


Figura 3. Medición de tensión en la barra de carga con variación en el tap del transformador.

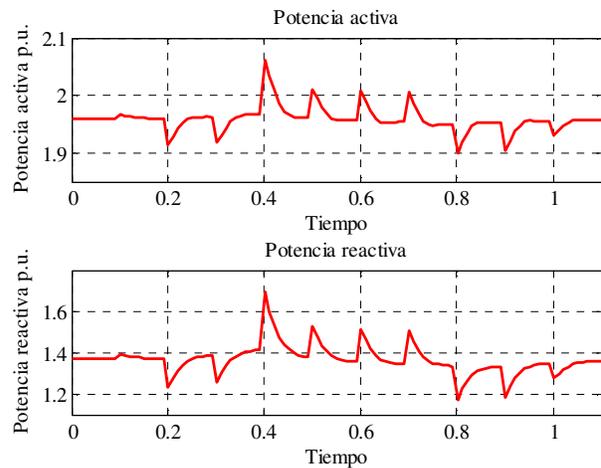


Figura 4. Medición de potencias activa y reactiva en la barra de carga, ante variación en el tap del transformador.

Al aplicar la estimación de parámetros con el algoritmo PSO descrito en la sección anterior, se obtuvo un conjunto de parámetros que se muestran en la Tabla 2. Los parámetros del modelo de carga se especifican en la Sección 2.2.

Función objetivo	1.2959e-004
$T_p$	0.0314
$N_{ps}$	-0.1117
$N_{pt}$	1.3001
$T_q$	0.0251
$N_{qs}$	-0.5812
$N_{qt}$	5.0024

Tabla 2. Resultados de la estimación de parámetros

Una vez obtenidos los parámetros a través del proceso de estimación, se evalúan en el modelo de recuperación exponencial empleando el registro de tensión de la Figura 3.

En la figura 5 y 6 se presentan en forma comparativa la respuesta de la potencia activa y reactiva del modelo estimado con las mediciones adquiridas del sistema.

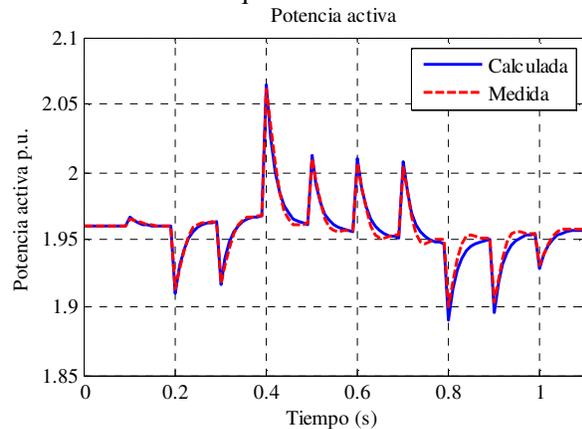


Figura 5. Comparación entre la potencia activa medida y la potencia activa estimada con el modelo.

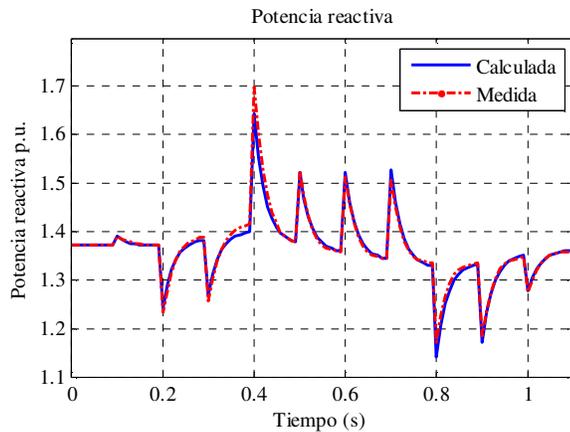


Figura 6. Comparación entre la potencia reactiva medida y la potencia reactiva estimada con el modelo.

Se observa que la respuesta obtenida mediante el proceso de estimación reproduce de manera adecuada las mediciones obtenidas del sistema, tanto en la potencia activa como en la potencia reactiva. El modelo de recuperación exponencial muestra una excelente capacidad para representar la respuesta de la carga cuando esta es sometida a variaciones en su tensión del tipo escalón unitario. A manera de validación, se prueba el modelo obtenido empleando una perturbación diferente a la utilizada en la estimación del modelo, la cual consiste en modificar el *tap* del transformador Tx de su valor inicial 1.01 a un valor final de 1.15, y 0.1 segundos después restablecer el *tap* a su valor original de 1.01. La perturbación realizada está representada en la Figura 7. Los resultados de la respuesta del modelo y su comparación con la medición de la respuesta del sistema se presentan en la Figura 8.

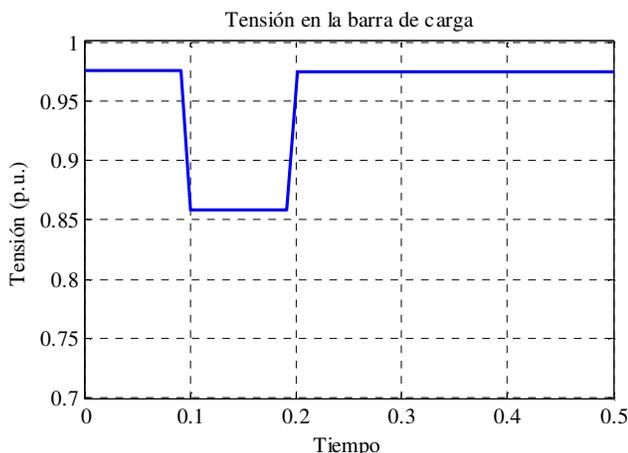


Figura 7. Medición de tensión para la validación del modelo calculado.

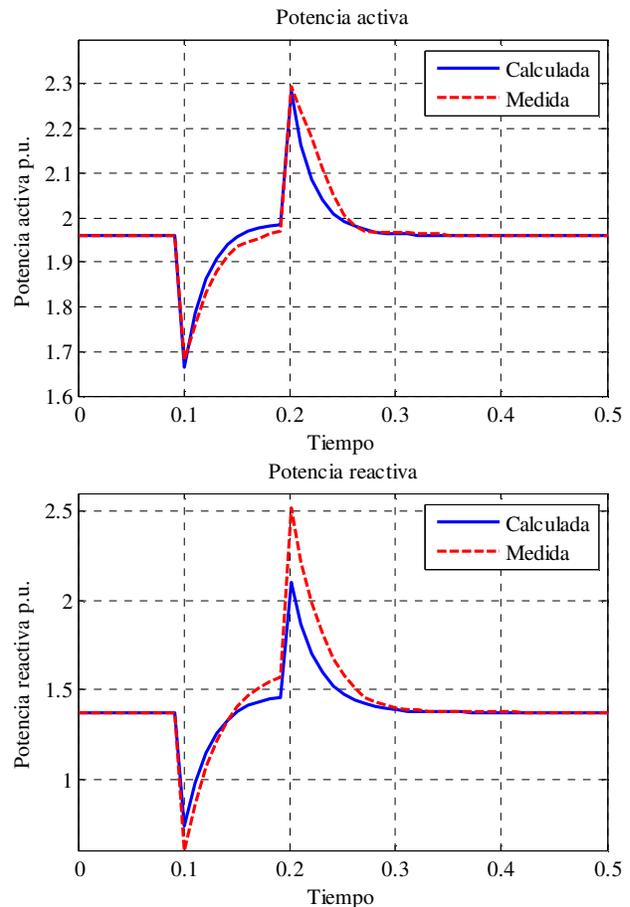


Figura 8. Validación de la respuesta del modelo ante una perturbación diferente.

De la Figura 8, se observa que la respuesta del modelo de carga ante la nueva conmutación, presenta una tendencia similar a la señal medida. Es importante notar que la diferencia entre las mediciones y la respuesta simulada puede ser generada por una limitada capacidad de generalización de la estructura empleada, lo que restringe su exactitud a un conjunto limitado de perturbaciones. Para solventar este problema, podría emplearse bases de datos que contengan un número considerable de posibles escenarios, así como metodologías híbridas que utilicen técnicas de adaptación para la actualización de los parámetros utilizados.

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de la implementación de una metodología de estimación de los parámetros de un modelo de recuperación exponencial, mediante la optimización por enjambre de partículas PSO, empleando las mediciones de tensión y potencia sobre un sistema sometido a perturbaciones controladas.

A partir de la implementación de la metodología propuesta, se demuestra que el modelo propuesto reproduce adecuadamente los datos empleados para la estimación. Adicionalmente, se validó la respuesta de la estimación, mediante la aplicación de

una perturbación diferente, mostrando un acercamiento aproximado en la representación ante condiciones no conocidas previamente. Este tipo de resultados validan el desarrollo de modelos de carga a partir de mediciones, los cuales pueden ser mejorados mediante el uso de estructuras más complejas, o técnicas de mayor rigurosidad matemática.

Finalmente, en el artículo se presentaron algunas de las estructuras más empleadas cuando se realiza el modelado de carga a partir de mediciones en los sistemas eléctricos, junto con una breve revisión bibliográfica de algunas de las metodologías propuestas para tal fin. Esto permitió observar la evolución de las diferentes metodologías para asegurar que el modelado de carga es una temática crítica en los SEP.

#### REFERENCIAS

- [1] K. Morison, H. Hamadani and L. Wang, "Practical Issues in Load Modeling for Voltage Stability Studies," in *Proc. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1392-1397.
- [2] T. J. Overbye, "Effects of load modelling on analysis of power system voltage stability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 329-338, Oct. 1994.
- [3] A. S. Debs, "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, no. 5, pp. 1260-1268, Sept. 1974.
- [4] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis of power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 472 – 482, May 1993.
- [5] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1302 –1313, Aug. 1995.
- [6] D. N. Kosterev, C.W. Taylor, W.A. Mittelstadt, "Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage," *IEEE Trans. Power Systems*, vol.14, no. 3, pp. 967-979, Aug. 1999
- [7] L. Y. Taylor, R. A. Jones and S. M. Halpin, "Development of Load Models for Fault Induced Delayed Voltage Recovery Dynamic Studies," in *Proc. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-7.
- [8] Y. Xu, D. Si, Y. Qian, "Research on Feasibility of Composite Load Modeling Based on WAMS," in *Proc. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC)*, pp.1-4.
- [9] R.M. Rifaat, "On composite load modeling for voltage stability and under voltage load shedding," in *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp.1603-1610.
- [10] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [11] S. Halwi, D.G. Holmes, T. Czaszejko and M. B. Khoorassani, "Improved Representation of Power System Load Dynamics Using Heuristic Models," in *Proc. 2008 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-6.
- [12] D. Karlsson and D. J. Hill, "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol.9, no.1, pp.157-166, Feb. 1994.
- [13] J. Shi and R.-M. He, "Measurement-based load modeling-model structure," in *Proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf.*, p. 5 pp.
- [14] I. R. Navarro, O. Samuelsson and S. Lindahl, "Automatic Determination of Parameters in Dynamic Load Models From Normal Operation Data," in *Proc. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1375-1378.
- [15] R.-M. He, J. Ma, and D. Hill, "Composite load modeling via measurement approach," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 663 – 672, may 2006.
- [16] D. Han, R. He, Y. Xu, J. Ma and M. Huang. "Measurement-based Load Modeling Validation by Artificial Three-phase Short Circuit Tests in North East Power Grid," in *Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6.
- [17] D. Han, J. Ma, R.-M. He and Z.-Y. Dong. "A Real Application of Measurement-Based Load Modeling in Large Scale Power Grids and Its Validation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, no. 4, pp 1756-1764, Nov. 2009.
- [18] J. Ma, X.-Y. Zheng, Y.-H. Tang and Z.-Y. Dong. "Validating Measurement-Based Composite Load Model," in *Proc. 8th Intl. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management*, pp. 1-6.
- [19] V. Knyazkin, C. A. Cañizares and L. H. Söder, "On the Parameter Estimation and Modeling of Aggregate Power System Loads," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1023-1031, May 2004.
- [20] B.-K. Choi, H.-D. Chiang, Y. Li, H. Li, Y.-T. Chen, D.-H. Huang, and M. Lauby, "Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1276 –1283, Aug. 2006.
- [21] H. Bai, P. Zhang, and V. Ajjarapu, "A novel parameter identification approach via hybrid learning for aggregate load modeling," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1145–1154, Aug. 2009.
- [22] B. K. Choi, H. D. Chiang and D.C. Yu, "Trust-Tech based Parameter Estimation and its Application to Power System Load Modeling," in *Proc. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8.
- [23] J. Ma, R. He and D. J. Hill, "Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data From Field Measurements," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 726-725, May 2006.

- [24] J. Ma, D. Han, R.-M. He, Z.-Y. Dong and D. Hill, "Reducing identified parameters of measurement-based composite load model," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 76–83, Feb. 2008.
- [25] W. Rosehart, D. Westwick, P. Jazayeri, J. Aguado and S. Martin, "Separable identification of nonlinear aggregate power system loads," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 2, pp. 346-354, Feb. 2009.
- [26] G. Shi, J. Liang and X. Liu, "Load clustering and synthetic modeling based on an improved fuzzy c means clustering algorithm," in *Proc. 2011 4th International Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp.859-865.
- [27] Q. Chen, P. Ju, Z.-Y. Shao and F. Wu, "Electrical Load Modeling with Considering Distribution Network," in *Proc. 2007 iREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control*, pp. 1-6.
- [28] Y. Tang, H.-B. Zhang, D.-X. Zhang and J.-X. Hou, "A synthesis load model with distribution network for power transmission system simulation and its validation," in *Proc. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp.1-7.
- [29] Q. Chen, P. Ju, K.Q. Shi, Y. Tang, Z.Y. Shao and W.Y. Yang, "Parameter estimation and comparison of the load models with considering distribution network directly or indirectly," *International Journal of Electrical Power & Energy Syst.*, vol. 32, no. 9, pp. 965-968, Nov. 2010.
- [30] Y. Mao, X. Wang, F. Yang, H. Wang, "Research on synthesis load modeling with online statistical measurement-based method," in *Proc. 2011 International Conf. on Consumer Electronics, Communications and Networks*, pp.674-677.
- [31] J. Zhang, A. Yan, Z. Chen and K. Gao, "Dynamic Synthesis Load Modeling Approach Based on Load Survey and Load Curves Analysis," in *Proc. 3rd. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 1067-1071.
- [32] S. Halwi, D. G. Holmes and T. Czaszejko, "The Effect of Normalisation on the Performance of a Stochastic Power System Load Model," in *Proc. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-6.
- [33] A. Y. Zomaya and S. Olariu, *Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications*. Taylor & Francis Group. 2006.
- [34] NEPLAN. Power System Analysis and Engineering. [www.neplan.ch](http://www.neplan.ch)