

2019

## Parametrización de un modelo de carga para la representación de una red con alta incidencia de variadores de velocidad tipo AC4 en entorno de simulación

Maria Paula Peña Osuna  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica)



Part of the [Electrical and Electronics Commons](#), and the [Other Electrical and Computer Engineering Commons](#)

---

### Citación recomendada

Peña Osuna, M. P. (2019). Parametrización de un modelo de carga para la representación de una red con alta incidencia de variadores de velocidad tipo AC4 en entorno de simulación. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/261](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/261)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

**PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE CARGA PARA LA REPRESENTACIÓN  
DE UNA RED CON ALTA INCIDENCIA DE VARIADORES DE VELOCIDAD TIPO  
AC4 EN ENTORNO DE SIMULACIÓN**

**Maria Paula Peña Osuna**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

**PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE CARGA PARA LA REPRESENTACIÓN  
DE UNA RED CON ALTA INCIDENCIA DE VARIADORES DE VELOCIDAD TIPO  
AC4 EN ENTORNO DE SIMULACIÓN**

**Maria Paula Peña Osuna**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Electricista**

**Director**

**Luis Fernando Rodríguez García, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C., mayo de 2019

*Dedicatoria...*

*Este trabajo de tesis está dedicado a todas aquellas personas que estuvieron conmigo en todo este proceso y de forma especial a mis padres y mi hermano.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento muy especial a mis padres y mi hermano, los cuales me apoyaron y ayudaron de manera incondicional en todo este proceso. A todas aquellas personas que estuvieron en el transcurso de estos años que me acompañaron y me enseñaron.

A la universidad de la Salle y a cada uno de los ingenieros docentes que hicieron parte de mi crecimiento formativo y personal, a mi director el Ing. Luis Fernando Rodríguez García por su apoyo. MUCHAS GRACIAS

## ÍNDICE GENERAL

<i>RESUMEN</i> .....	10
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	11
<b>1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>13</b>
1.1. Descripción del problema.....	13
1.2. Formulación del problema .....	14
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1. Objetivo general .....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1. Modelos dinámicos de recuperación exponencial.....	16
3.2 Optimización por enjambre de partículas.....	19
3.3 Estabilidad de tensión .....	18
3.4 Variador de velocidad AC4 .....	19
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>21</b>
4.1 Red de distribución.....	21
4.2 Generación de parámetros.....	22
4.3 PSO para determinación de parámetros del modelo de carga.....	22
4.4 Evaluación del ajuste .....	22
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
5.1 Sistema de prueba con falla 1 .....	26
5.1.1 Configuración para la barra 1 con presencia de la falla 1 .....	26
5.1.2 Configuración para la barra 2 con presencia de la falla 1 .....	29

5.2	Sistema de prueba con falla 2 .....	32
5.2.1	Configuración para la barra 1 con presencia de la falla 2 .....	32
5.2.2	Configuración para la barra 2 con presencia de la falla 2 .....	34
6.	<i>CONCLUSIONES</i> .....	37
7.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	38
	<i>ANEXO</i> .....	40



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Valores de los parámetros para el comportamiento de la barra 1 .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2 Valores de los parámetros para el comportamiento de la barra 2 .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3 Valores de los parámetros para la barra 1 con presencia de la falla 2 .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4 Valores de los parámetros para la barra 2 con presencia de la falla 2 .....</i>	<i>35</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Comportamiento de la tensión y recuperación exponencial de la potencia activa.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2 Bloque del variador de velocidad AC4.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 Red de distribución.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4 Configuración de la matriz de valores.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5 Metodología para la generación de parámetros.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6 Red de distribución con identificación de elementos y punto de falla.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7 Red de distribución con identificación de puntos de medición.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8 Comportamiento de la tensión en la barra 1 con la presencia de la falla 1.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9 Comportamiento de la potencia activa y reactiva en la barra 1 con la presencia de la falla 1.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10 Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 1 con presencia de la falla 1.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11 Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 1.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12 Comportamiento de la tensión en la barra 2 con presencia de la falla 1.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13 Comportamiento de la potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 1.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 14 Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 1.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15 Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16 Comportamiento de la tensión (a) y potencias (b) de la barra 1 con presencia de la falla 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17 Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 1 con la presencia de la falla 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18 Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 1 con la falla 2.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19 Comportamiento de la tensión (a) y potencias (b) en la barra 2 con presencia de la falla 2.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 20 Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 2.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 21 Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 2 con la falla 2.....</i>	<i>36</i>

## RESUMEN

Este proyecto presenta una estrategia para determinar los parámetros que debe tener un modelo para una carga que cuente con variadores de velocidad tipo AC4, empleando un modelo de recuperación exponencial y que se pueda aplicar en estudios de estabilidad de la tensión de una red de distribución, en un entorno de simulación. Para esto, se implementa un modelo de red eléctrica en Simulink-Matlab que cuenta con la conexión de diversas cargas, entre las cuales esta el variador de velocidad tipo AC4; esta red se somete a fallas trifásicas y se determinan los valores de tensión, potencia activa y reactiva; los cuales se introducen en un modelo de recuperación exponencial para realizar la correspondiente comparación entre los valores medidos y los simulados, y así determinar los parámetros que debe tener dicho modelo que presenta un comportamiento exponencial ante estos escenarios. Este procedimiento se realiza para dos puntos de medición y de esta manera garantizar la estabilidad del sistema.

## INTRODUCCIÓN

Se requieren equipos y herramientas que ayuden a garantizar la estabilidad del sistema, sabiendo que no se puede determinar al 100% en que momento se va a presentar una falla se debe estar preparado para una y saber como recuperar la estabilidad del sistema de potencia. Para los estudios de estabilidad se deben tener en cuenta las cargas que se encuentren conectadas a la red. Seria ideal que al sistema de potencia solo se encontraran conectadas cargas estáticas pero debido a lo diferentes elementos con los que se encuentran fabricados los equipos hay que tener en cuenta cargas dinámicas. Estas cargas dinámicas son de gran importancia ya que son las que generan mayor aporte en la variación de la tensión, potencia activa y reactiva de la red.

Debido a la presencia de reacciones inadecuadas para la red por los motores, hay documentos como (Ingalalli & Bapiraju, 2017) en el cual se desarrolla un modelo analítico para el control de ciclo cerrado de un motor de inducción el controlador del motor que está bajo prueba para la funcionalidad de control de velocidad y par se interconecta a la plataforma de hardware que simula el modelo de la planta en tiempo real, pero en (Piñero, 2015) se evalúa el comportamiento de un motor de inducción (carga dinámica) al conectarse a una red, de lo cual se concluye que sería sencillo hacer una ampliación en la red, incorporando otros variadores de frecuencia para el control de motores como se ha visto, o el control de otras máquinas como ventiladores o bombas. Mientras que en (Merkle & Miri, 2001) se realiza un estudio de estabilidad teniendo en cuenta cargas estáticas y dinámicas, sin embargo, las cargas dinámicas a tener en cuenta (motores) no son correctamente simulados con todos sus elementos por lo que los resultados no son del todo precisos.

Estudios con los ya mencionados se basan principalmente en el comportamiento de la carga, pero en (Rodríguez García, Pérez Londoño, & Mora Flórez, 2013) se estudia el comportamiento de la red teniendo en cuenta una carga compuesta que al presentarse una falla presenta una recuperación de tipo exponencial, esta red es empleada para realizar la estimación de parámetros por medio de un problema de optimización que se basa en la técnica de enjambre de partículas, sin hacer mayor énfasis en la carga dinámica empleada.

Si bien existen estudios que analizan la estabilidad de tensión del sistema de potencia en el presente documento plantea un modelo de red en Simulink-Matlab teniendo en cuenta un modelo compuesto de carga, siendo la parte dinámica un modelo de motor en compañía de un variador de velocidad para mayor exactitud, estableciendo cada característica tanto de la carga como de la red según elementos de tiempo real, modelo para el cual se realiza la estimación de parámetros por medio de la optimización de partículas.

A continuación, se presentan la sección 1 con la definición del problema, en la sección 2 se encuentran los objetivos planteados, la sección 3 contiene el marco teórico que se emplea en el presente proyecto, el proceso con el cual se desarrolla el modelo y la estimación de parámetros se encuentran en la metodología en la sección 4, continuando con los resultados obtenidos de las simulaciones y mediciones en la sección 5 y por último la sección 6 con las conclusiones del trabajo propuesto.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción del problema

Actualmente, el sector industrial ha presentado un crecimiento importante en Colombia, en comparación con el sector comercial y residencial. De acuerdo con el BECO (Balance Energético Colombiano), el sector industrial colombiano consume casi el 30% de la energía final del país, siendo el segundo sector más consumidor después del transporte, además de que la energía eléctrica alcanza el 17% de la energía final usada en la industria y promete un crecimiento (García, Plan de acción indicativo de eficiencia energética, 2016) (García, Tendencias a largo plazo del sector energía en Colombia, 2014) En este sector para el ámbito de la electricidad, los sistemas de fuerza motriz (motores) representan más del 75% del consumo de energía en el sector industrial colombiano (García, Plan de acción indicativo de eficiencia energética, 2016). Estos equipos debido a sus características presentan un papel importante ante la demanda de energía y la presencia de variaciones en la tensión. Debido a esto es que se conectan elementos electrónicos con los cuales se corrige y controla a los motores para evitar dichas variaciones y disminuir el riesgo para la red eléctrica y los demás elementos conectados. Entre los elementos electrónicos que se conectan a los motores se encuentran los variadores de velocidad, los cuales controlan la frecuencia de la tensión con la que se alimenta el motor, y, por ende, su velocidad. Ahora, para comprender el comportamiento transitorio del sistema de distribución en caso de una contingencia, se emplean simulaciones dinámicas para observar la evolución de las variables ante el evento, a través de modelos representativos de redes eléctricas y las cargas conectadas a este. Dichos modelos, en especial los modelos de carga, son de gran ayuda para la simulación de los sistemas sin necesidad de hacer la representación detallada de todos los elementos que se conectan a la red. Los modelos convencionales para la representación

de las cargas se formulan a partir de la respuesta de elementos lineales o motores de inducción. Sin embargo, dado el volumen de consumidores, combinado con el crecimiento en el uso de la electrónica de potencia para el control de velocidad, se hace necesario analizar si el comportamiento que tiene la tensión, potencia activa y reactiva, ante un evento, está siendo modelado y representado de manera adecuada. En este escenario, el desarrollo de un modelo de carga para este tipo de elementos de carga sigue siendo útil, siempre y cuando los modelos puedan representar las características de las cargas en las que se encuentran conectadas.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cómo desarrollar un modelo de carga para los variadores de velocidad AC4, que sea aplicable a estudios de estabilidad del sistema de potencia, a partir de un modelo de recuperación exponencial?

## 2. OBJETIVOS

### 2.1.Objetivo general

Parametrizar un modelo dinámico de carga para una red que tiene alta participación de variadores de velocidad tipo AC4, a partir de datos obtenidos mediante simulación.

### 2.2.Objetivos específicos

- Implementar una simulación de una red de distribución considerando el efecto del motor y del variador de velocidad tipo AC4.
- Obtener parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial a partir de datos de simulación de la red de distribución implementada.
- Comparar el comportamiento de la respuesta del modelo de recuperación exponencial obtenido con el de la simulación de la red completa.

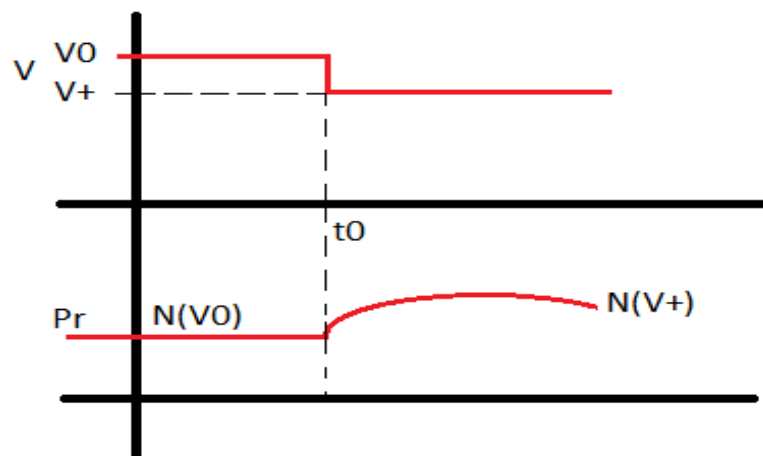


### 3. MARCO TEÓRICO

En esta sección se darán a conocer conceptos asociados al problema planteado, como el modelo dinámico de recuperación exponencial, estabilidad del sistema, optimización por enjambre de partículas y variadores de velocidad tipo AC4.

#### 3.1. Modelos dinámicos de recuperación exponencial

En (Karlsson & Hill, 1994) se describe un enfoque para la determinación experimental de cargas dinámicas agregadas en sistemas de energía. En este se presenta un modelo que 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 como se observa en la figura 1.



*Figura 1. Comportamiento de la tensión y recuperación exponencial de la potencia activa.*

Además de esto, los parámetros que describen el comportamiento de las cargas compuestas que se contengan tienen que ser identificadas. Este comportamiento se modela a partir de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden de acuerdo a (1) y (2):

$$\frac{dx_p}{dt} = -\frac{1}{T_p x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{ps}} - P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}}} \quad (1)$$

$$\frac{dx_q}{dt} = -\frac{1}{T_q x_q + Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qs}} - Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}}} \quad (2)$$

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 (Rodriguez Garcia, Pérez Londoño, & Mora Flórez, 2013).

### 3.2. Optimización por enjambre de partículas

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas es un método basado en el mecanismo de la evolución y la genética natural, y que puede ser aplicado en problemas de asignación de tareas (Zomaya, 2006). 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 (Rodriguez Garcia, Pérez Londoño, & Mora Flórez, 2013).

### **3.3. Estabilidad de tensión**

Un sistema de potencia está funcionando en un estado de equilibrio estable desde el punto de vista de la tensión cuando las tensiones en todas las barras están dentro de un rango aceptable; si se produce una perturbación en el sistema, este es capaz de retomar en un tiempo aceptable a un estado de equilibrio (igual o distinto al anterior) en que la tensiones en todas las barras están dentro de un rango aceptable (Cordoba, 2017).

En relación a la definición matemática de estabilidad de un sistema dinámico en torno a un punto de equilibrio, se introduce la exigencia adicional de que la tensión este dentro de un rango aceptable luego de la perturbación que no este debajo de 0.8 p.u. durante mas de 700 ms (Proeva

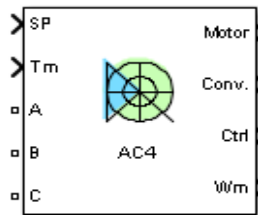
2014). Par el caso particular de Colombia la CREG establece que en las barras principales del sistema de transmisión la tensión transitoria no debe estar por debajo de 0.8 p.u. durante más de 500 mseg. Al evaluar la estabilidad del sistema de transmisión ante pequeñas perturbaciones, se debe chequear que los valores propios tengan componente de amortiguación. Si no hay amortiguación se deben ajustar apropiadamente los sistemas de control de las unidades de los equipos del SIN y como último recurso, limitar las transferencias por el sistema de transmisión (CREG, 1995, pág. 83).

### **3.4. Variador de velocidad AC4**

El bloque de accionamiento del Motor de inducción DTC (AC4) representa un accionamiento de control escalar mejorado para motores de inducción con par directo y control de flujo. Este variador cuenta con control de velocidad de lazo cerrado mediante controladores de flujo y par de banda de histéresis. El lazo de control de velocidad emite el par electromagnético de referencia y flujo del estator de la máquina. Las referencias de par y flujo se comparan con sus valores estimados, respectivamente, y los errores se envían a los controladores de banda de histéresis. Las salidas de los controladores de la banda de histéresis se usan para obtener las señales de puerta necesaria para el inversor a través de una tabla de conmutación óptima.

La principal ventaja de esta unidad en comparación con otras unidades de control escalar es su mejor respuesta dinámica. Esta unidad puede reducir el impacto de la variación de par en el flujo y, a la inversa, a través de una tabla de conmutación óptima. Por lo tanto, esta unidad es menos sensible al efecto de acoplamiento inherente (entre el par y flujo) presentes en la máquina.

Sin embargo, esta unidad requiere un procesamiento de señal similar al de las unidades controladas por vector, lo que hace su aplicación compleja en comparación con las unidades controladas de circuito cerrado en voltios/Hertz (Mathworks, 1994-2019).



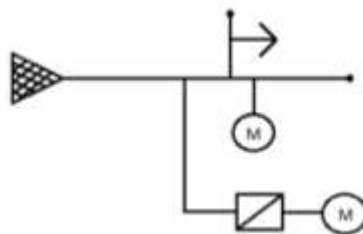
*Figura 2. Bloque del variador de velocidad AC4*

## 4. METODOLOGÍA

Dado que es importante garantizar la estabilidad de un sistema de potencia, se realizan estudios mediante simulación y de esta manera estar preparados ante cualquier evento, por ello se plantea un modelo de red del cual será necesario conocer el comportamiento y determinar los valores de la tensión, potencia activa y reactiva ante una eventualidad, como por ejemplo una falla trifásica. Se utiliza el modelo de recuperación exponencial para comparar los valores medidos con los simulados y de esta manera determinar los parámetros que debe tener un modelo de recuperación exponencial.

### 4.1 Red de distribución

Se plantea un modelo de red de distribución que incluya elementos convencionales y que tenga la presencia de variadores de velocidad. Este modelo puede contener la cantidad que se desee de elementos independiente de su naturaleza, ya sea industrial, comercial o residencial, teniendo en cuenta que vale la pena considerar el efecto dinámico de las cargas, como lo son los motores que pueden estar conectados directamente a la red o por medio de una interfaz de electrónica de potencia.



*Figura 3.* Red de distribución

Para desarrollar el modelo de carga, a partir de un enfoque basado en mediciones, es necesario definir el punto de medición, el cual dependerá de qué tanta carga se quiera concentrar

o representar a través de un único modelo. Las mediciones se establecerán en un intervalo de tiempo que comprenda antes, durante y después de la falla a la que se someta la red.

#### 4.2 Generación de parámetros

Una vez realizada la simulación por medio de medidores se extraen los valores de tensión, potencia activa y potencia reactiva, los cuales se organizan en una matriz, teniendo en primer lugar el tiempo luego la tensión continuando con una columna de ceros, que hace referencia al ángulo, y terminando con la potencia activa y reactiva

Tiempo (t)	Tensión (V)	Ángulo ( $\theta$ )	Potencia activa (P)	Potencia reactiva (Q)
---------------	----------------	------------------------	---------------------------	-----------------------------

Figura 4. Configuración de la matriz de valores

#### 4.3 PSO para determinación de parámetros del modelo de carga

Estos valores serán incluidos en el modelo de recuperación exponencial, el cual realiza el siguiente proceso:



Figura 5. Metodología para la generación de parámetros

Paso 1. Se incluye la matriz de valores previamente organizados en el código de recuperación exponencial, con los cuales se generan diversos grupos, cada uno compuesto de los siguientes parámetros  $(T_p, N_{ps}, N_{pt}, T_q, N_{qs}, N_{qt})$  y se establecen en una primera posición.

Paso 2. Se evalúa la función objetivo con los conjuntos de parámetros iniciales, la cual consiste en minimizar la suma de los cuadrados de la diferencia de las potencias

$$\sum(P_s - P_m)^2 + (Q_s - Q_m)^2 \quad (3)$$

determinando el mejor conjunto de parámetros según la posición actual, teniendo en cuenta que los parámetros  $T_p$  y  $T_q$  no deben ser negativos, y  $N_{ps}, N_{pt}, N_{qs}, N_{qt}$  se encuentren en un rango de -5 y 5.

Paso 3. Se realiza un desplazamiento ubicando los conjuntos de partículas en nuevas posiciones.

Paso 4. Se evalúa nuevamente la función objetivo, a partir de esto se realiza la comparación con el conjunto de parámetros óptimo evaluado y seleccionado anteriormente, si con el nuevo conjunto de parámetros se tiene un mejor resultado, este quedará guardado.

Paso 5. Se realiza nuevamente un desplazamiento teniendo en cuenta el conjunto de parámetros óptimo seleccionado

Paso 6. Para este proceso se establecen dos criterios de parada: primero, un número máximo de 500 iteraciones en el cual se repetirá el proceso para determinar el conjunto de parámetros óptimo, y segundo, un conteo de número máximo de 49 iteraciones en que, si la incumbente no cambia, se asume que hay convergencia y se detiene el proceso. Teniendo esto en



cuenta en el proceso se verifican los criterios de parada y en caso tal de que se satisfaga alguno se detiene el proceso, de no ser así se regresa al paso 4.

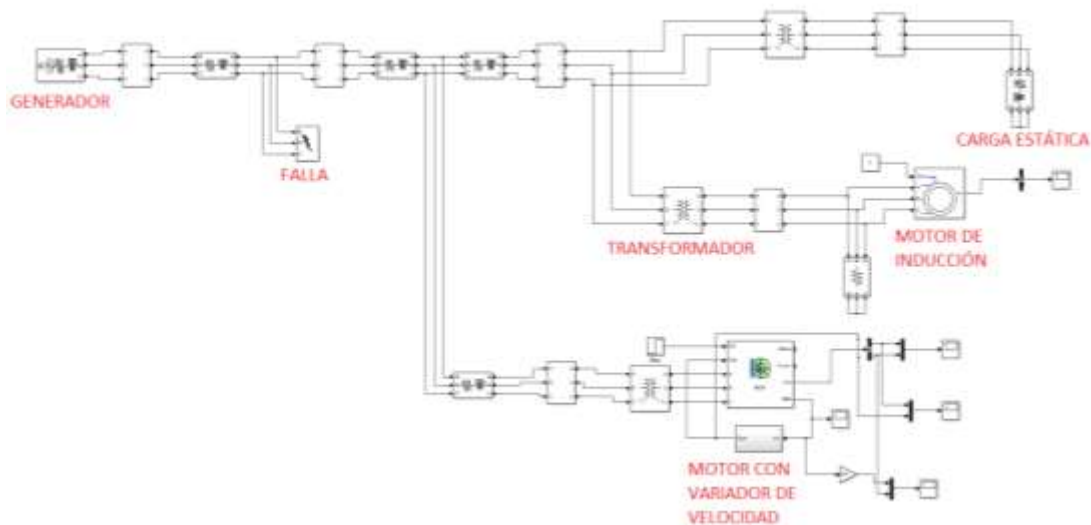
#### 4.4 Evaluación del ajuste

Este proceso se realiza para cada uno de los grupos de valores obtenidos en cada punto de medición seleccionado, por medio de manera gráfica se evidencia la similitud entre los valores medidos y los simulados, sin embargo, se emplea (3) para determinar el error entre dichos valores.

$$e = \frac{1}{N} \sum \left| \left( \frac{\text{mediciones}(k) - \text{simulacion}(k)}{\text{mediciones}(k)} \right) \right| * 100\% \quad (4)$$

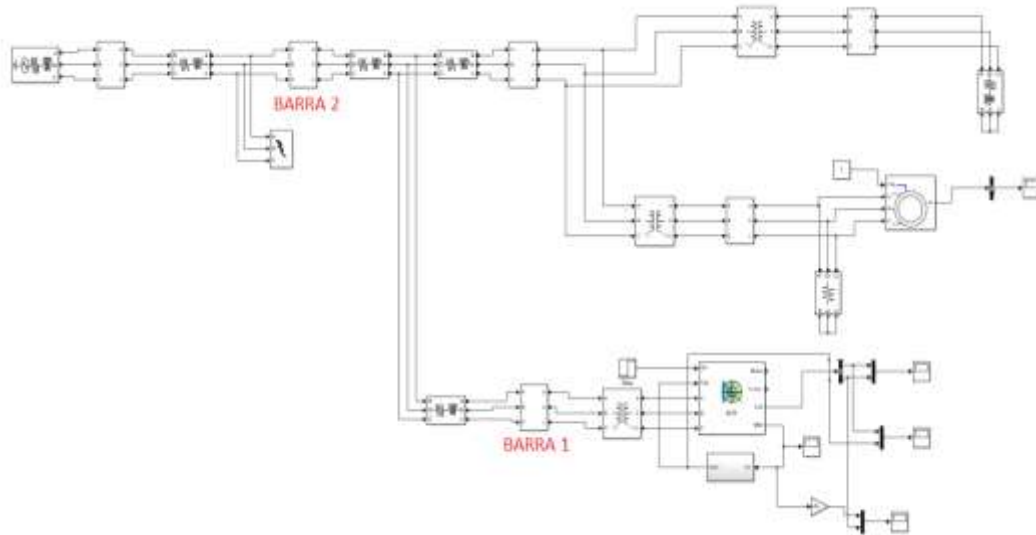
## 5. RESULTADOS

Teniendo en cuenta la metodología del proyecto, se plantea un sistema de prueba radial en simulink-matlab que consta de un generador, tres transformadores, que disminuyen la tensión para cada una de las cargas, ya que se planea incluir el efecto de cargas de naturaleza industrial, se emplea un motor de inducción, un pequeño modelo de carga estática y el motor en compañía del variador de velocidad (AC4). Con la conexión de todos los elementos mencionados, la red es sometida a una falla trifásica en la línea principal como se observa en la figura 5.



*Figura 6. Red de distribución con identificación de elementos y punto de falla.*

Teniendo en cuenta esta falla, para este caso en particular se evalúa en dos puntos de medición, uno donde se encuentra el variador de velocidad AC4 (Barra 1) y otro, en un punto remoto que comprende toda la carga presente (Barra 2), y de esta manera evaluar la validez del modelo mediante simulación con el modelo basado en mediciones cuando se tienen en cuenta se agregan más o menos elementos.



*Figura 7. Red de distribución con identificación de puntos de medición*

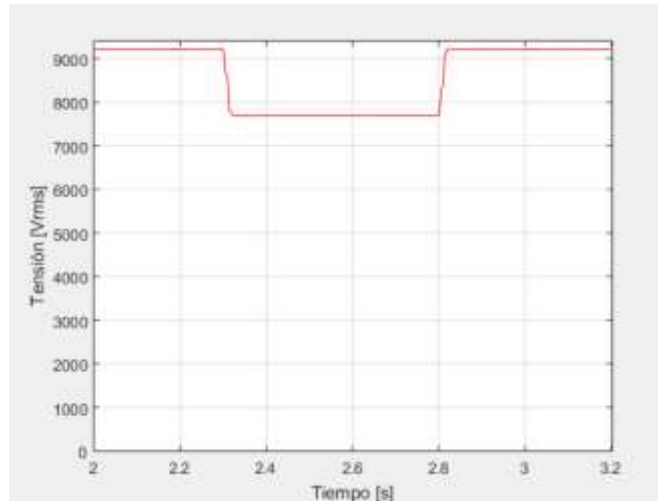
Al haber seleccionado los puntos de medición, se obtienen de manera gráfica el comportamiento de la tensión, potencia activa y reactiva, al igual que sus valores para cada punto. Así como también se evalúa para dos magnitudes de falla diferentes.

### **5.1 Sistema de prueba con falla 1**

En este primer escenario se tiene una falla trifásica con un valor de  $50\Omega$  ubicado en la línea principal de la red como se observa en la figura 6.

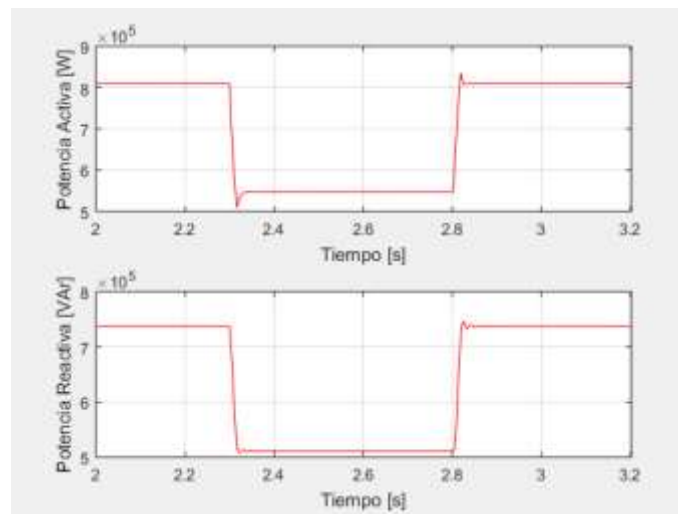
#### **5.1.1 Configuración para la barra 1 con presencia de la falla 1**

En esta barra se encuentra ubicada la carga compuesta por el motor con el variador de velocidad (AC4), al someter la red a la falla la tensión en este punto se reduce un 16.63% y presenta un comportamiento exponencial en el momento que recupera su estabilidad como se observa en la figura 8.



*Figura 8. Comportamiento de la tensión en la barra 1 con la presencia de la falla 1.*

De igual manera la potencia activa y reactiva presentan una reducción del 32.4% y del 30.7%, respectivamente, en el momento de la falla, como se muestra en la figura 9.



*Figura 9. Comportamiento de la potencia activa y reactiva en la barra 1 con la presencia de la falla 1.*

Igualmente es necesario obtener de manera numérica los valores de tensión y potencias, por lo que se emplea el bloque de To workspace presente en Matlab para extraer dichos valores,

estos se ordenan en la matriz con el orden previamente mencionado en Excel para introducirlos en el modelo de recuperación exponencial. Teniendo esto en cuenta el modelo evalúa cada conjunto de parámetros en cada velocidad obteniendo de esta manera el conjunto óptimo, siendo:

Parámetros óptimos al evaluar PSO	
Parámetro	Valor
$T_p$	0.0214
$N_{ps}$	-4.3006
$N_{pt}$	2.4282
$T_q$	0.0010
$N_{qs}$	2.7673
$N_{qt}$	2.0285

Tabla 1. Valores de los parámetros para el comportamiento de la barra 1.

Y de manera gráfica se puede observa el comportamiento de los valores medidos y los simulados

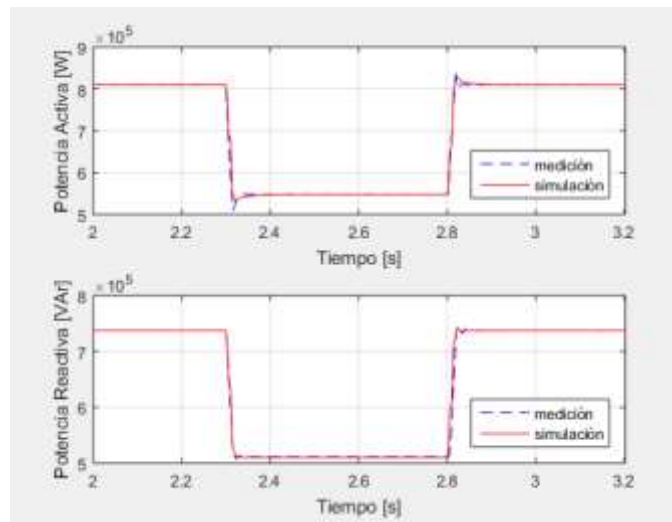
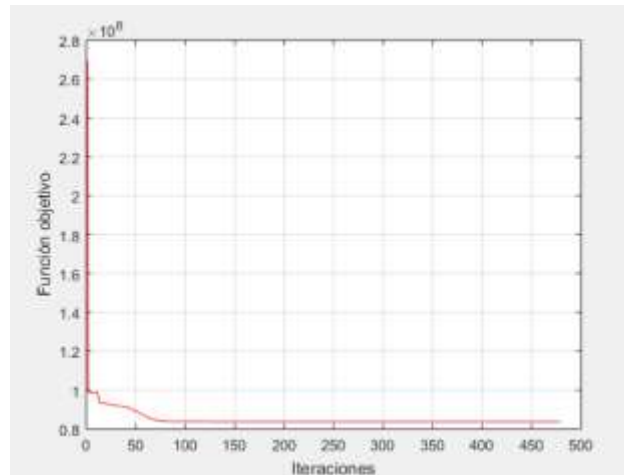


Figura 10. Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 1 con presencia de la falla 1.

Para confirmar la similitud de estas dos gráficas, se determina el error porcentual entre ambas mediciones, ya que por medio de (3) se obtiene un valor punto a punto, se halla la media la cual determina que hay un error del 0.2693 %

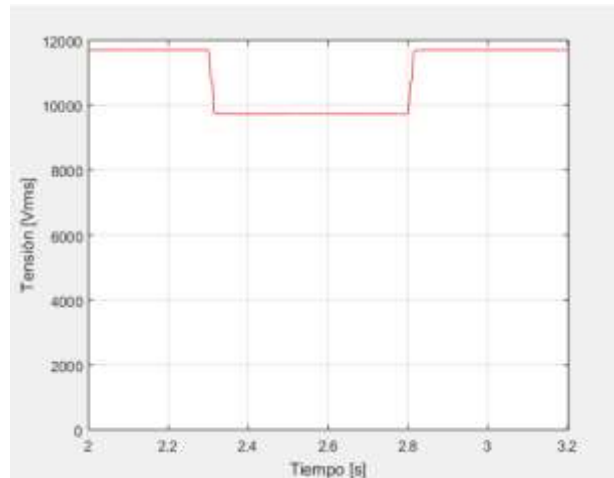
Adicional a esto, ya que por cada desplazamiento se evalúa la función objetivo, podemos observar el comportamiento que esta presenta con cada grupo de valores seleccionado (Figura 11), en el que se observa como va disminuyendo la función objetivo según el número de iteraciones, sin embargo, para este caso el criterio de parada es el de las 49 iteraciones en las que no mejora la incumbente.



*Figura 11. Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 1.*

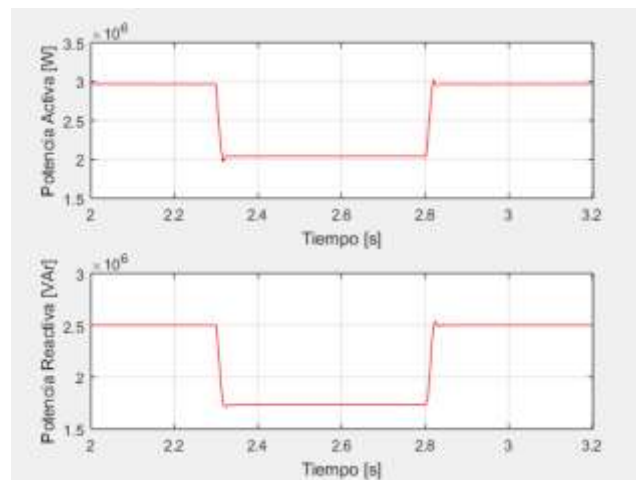
### **5.1.2 Configuración para la barra 2 con presencia de la falla 1.**

Para la barra 2 se realiza el mismo proceso, solo que este ya es una representación de un modelo que comprende todas las cargas presentes en la red propuesta, la tensión como se evidencia en la figura 12, presenta una caída del 16.8% y de igual manera para recuperar su estabilidad lo hace de manera exponencial.



*Figura 12. Comportamiento de la tensión en la barra 2 con presencia de la falla 1.*

Con respecto a las potencias que tienen un valor de 2.966 MW y 2.5 MVAR para la activa y reactiva respectivamente, igualmente luego de ocurrida la falla, presentan una recuperación de manera exponencial al cado de haber caído un 31.2% y 30.8%.



*Figura 13. Comportamiento de la potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 1.*

Para lo cual se ingresan los valores en el modelo de recuperación exponencial obteniendo los siguientes parámetros:

Parámetros óptimos al evaluar PSO	
Parámetro	Valor
$T_p$	0.0360
$N_{ps}$	1.7142
$N_{pt}$	2.0588
$T_q$	0.0010
$N_{qs}$	1.1896
$N_{qt}$	2.0121

Tabla 2. Valores de los parámetros para el comportamiento de la barra 2.

Teniendo en cuenta este grupo de parámetros, de manera gráfica los valores simulados con los valores medidos se observan de la siguiente manera:

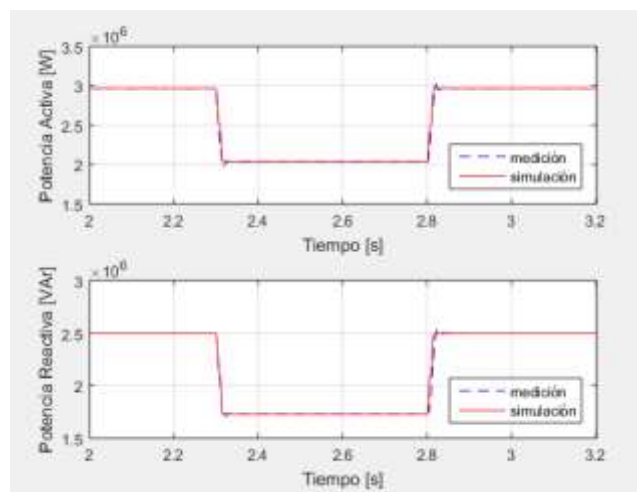


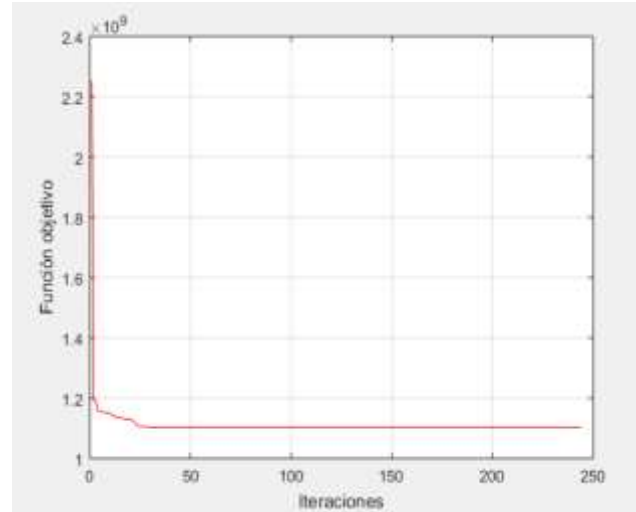
Figura 14. Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 1.

Observando el comportamiento exponencial y la similitud entre ambos valores, bien sea para la potencia activa como para la potencia reactiva, validando igualmente de manera numérica su similitud empleando (3) se determina un error promedio del 0.2407 %.

En la figura 15 se observa como la función objetivo va minimizando conforme al número



de iteraciones siendo en este caso el criterio de parada al cabo de 243 iteraciones.



*Figura 15. Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 2.*

## 5.2 Sistema de prueba con falla 2

Para determinar la efectividad del modelo de recuperación exponencial se evalúa la red de distribución, en este caso con una resistencia de falla de  $10\Omega$ , ubicada en el mismo punto de la línea principal.

### 5.2.1 Configuración para la barra 1 con la presencia de la falla 2

Al igual que el caso de la falla 1 se obtiene los valores de tensión, potencia activa y reactiva observando su comportamiento en la figura 16 para el punto de medición de la barra 1, presentando cada uno una caída del 52.9%, 74.7% y 77.5% respectivamente.

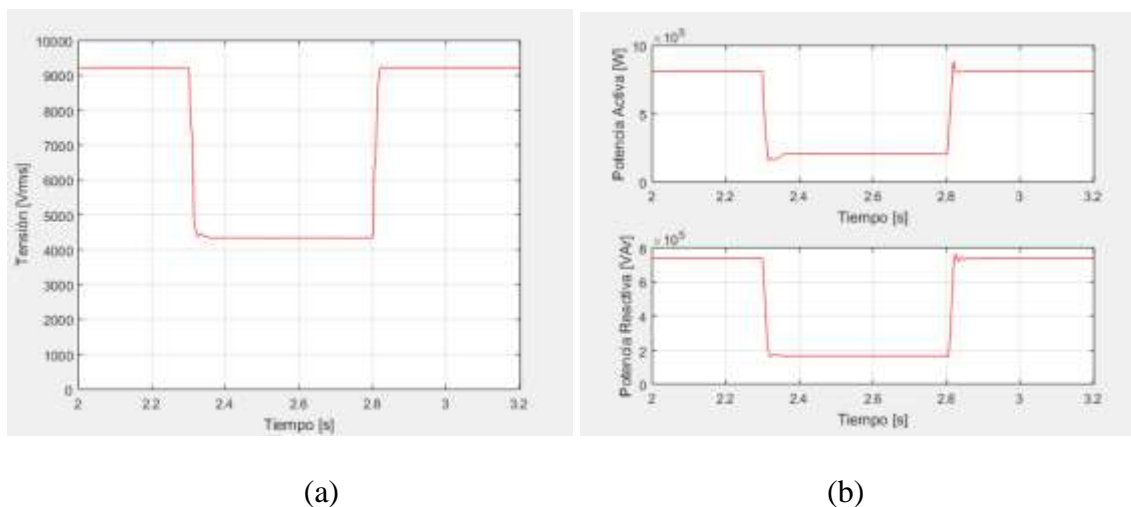


Figura 16. Comportamiento de la tensión (a) y potencias (b) de la barra 1 con presencia de la falla 2.

Obteniendo estos valores no solo de manera gráfica sino también numérica, son ingresados en el código de recuperación exponencial en forma matricial, como se mencionó anteriormente para realizar la comparación con dicho modelo. De manera gráfica en la figura 17 se observa el comportamiento y la similitud de ambos grupos de valores

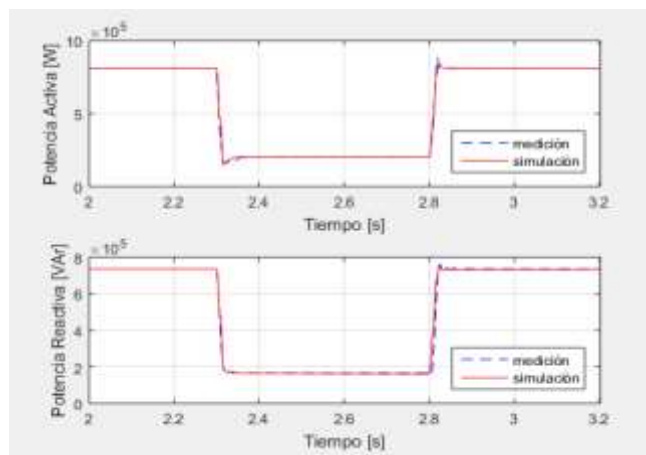


Figura 17. Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 1 con presencia de la falla 2.

Obteniendo, después de 323 iteraciones, el grupo de parámetros de la tabla 3, con un error porcentual promedio del 0.8045 % determinado igualmente a partir de (3).

Parámetros óptimos al evaluar PSO	
Parámetro	Valor
$T_p$	0.0112
$N_{ps}$	-3.1608
$N_{pt}$	2.6788
$T_q$	0.9288
$N_{qs}$	2.0693
$N_{qt}$	1.9853

Tabla 3. Valores de los parámetros para la barra 1 con presencia de la falla 2.

Parámetros que se seleccionaron siguiendo el comportamiento que se observa en la figura 18 de la función objetivo hasta determinar el resultado óptimo.

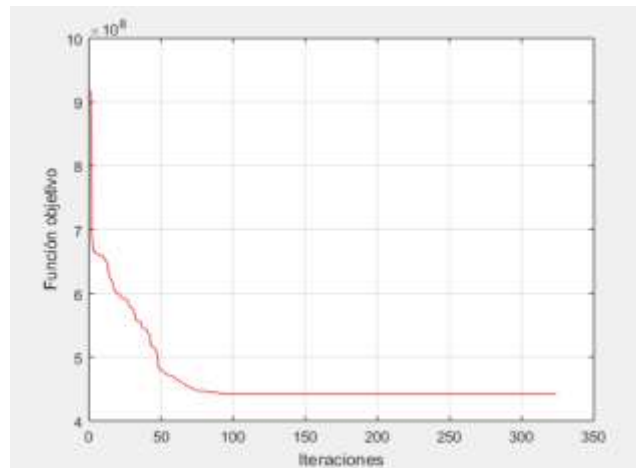
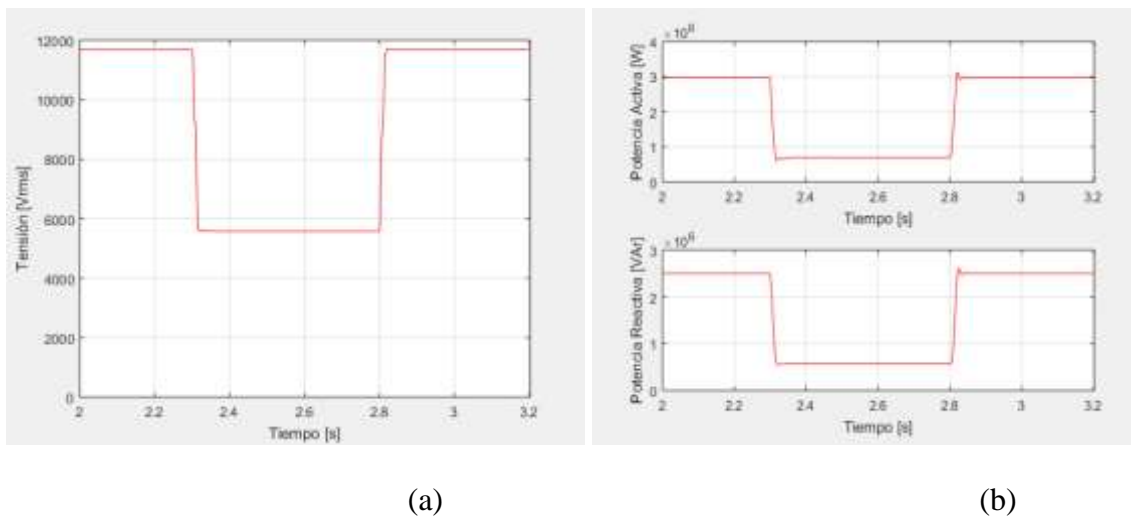


Figura 18. Comportamiento de la función objetivo para el modelo en el punto de medida 1 con la falla 2.

### 5.2.2 Configuración para la barra 2 con la presencia de la falla 2

En este punto de medición se tiene una reducción del 52.35% en la tensión y del 76.3% y el 77.3% en la potencia activa y reactiva respectivamente, observando su comportamiento en la figura 19.



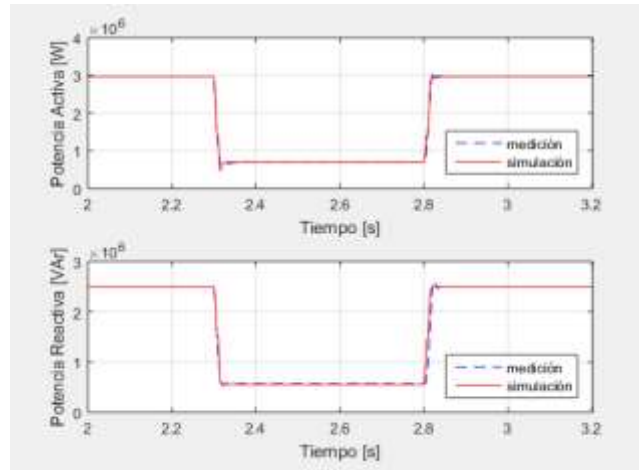
*Figura 19. Comportamiento de la tensión (a) y potencias (b) en la barra 2 con presencia de la falla 2.*

Con este grupo de valores medidos, realizando la comparación con los valores simulados en el código, al cabo de las 500 iteraciones, se determinó la parada del modelo de recuperación exponencial, obteniendo los parámetros de la tabla 4.

Parámetros óptimos al evaluar PSO	
Parámetro	Valor
$T_p$	0.0032
$N_{ps}$	-5.0000
$N_{pt}$	3.0240
$T_q$	0.0020
$N_{qs}$	1.8223
$N_{qt}$	2.0309

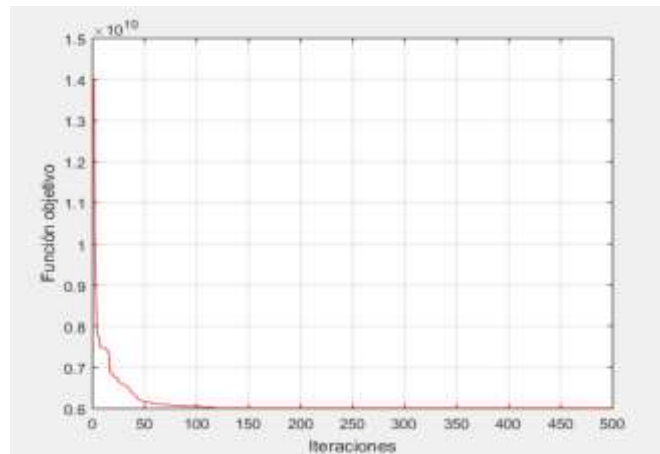
*Tabla 4. Valores de los parámetros para la barra 2 con presencia de la falla 2.*

Para lo cual se tiene un error porcentual del 0.7791% y presentando un comportamiento entre ambos valores como se presenta a continuación



*Figura 20. Valores medidos vs simulados de potencia activa y reactiva en la barra 2 con presencia de la falla 2.*

Evaluando la función objetivo presenta el comportamiento de la figura 21, en la cual se observa como va descendiendo y finalizando al cabo de las 500 iteraciones.



*Figura 21. Comportamiento función objetivo para el modelo en el punto de medida 2 con la falla 2.*

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una técnica para la obtención de los parámetros ( $T_p$ ,  $N_{ps}$ ,  $N_{pt}$ ,  $T_q$ ,  $N_{qs}$ ,  $N_{qt}$ ) de un modelo de carga que cuente con variadores de velocidad tipo AC4 y presentan una recuperación de tipo exponencial al momento de una falla. Se evaluó ante el comportamiento de la potencia activa y reactiva en dos puntos de medición diferentes y ante dos fallas de diferente magnitud. En ambos puntos de medición se presentó el mismo comportamiento en el que decae y luego de ocurrida la falla tanto la tensión como las potencias recuperan su estabilidad, claro está que el porcentaje que decaen es diferente en cada escenario debido a la magnitud de la falla, es decir, a menor magnitud del valor de la falla mayor es la caída de tensión y potencias.

Por otra parte, por medio de las gráficas se observa que para todos los escenarios se acoplan los valores simulados con los medidos, sin embargo, al determinar el error, numéricamente se puede observar que se presentó mejor respuesta en el punto de medición dos, es decir, en el punto en donde se comprende toda la carga presente en el modelo planteado, ya que el error porcentual obtenido es menor que en el punto de medición que comprende la carga dinámica que cuenta con el variador de velocidad. A pesar de esto, para estudios de la carga en particular, debido al bajo porcentaje de error y al gran número de cargas que se encuentran conectadas al sistema de potencia, el modelo puede emplearse para determinar los parámetros de estos, bien sean estáticos o dinámicos; puntualmente, para el caso de estudio de este proyecto, presentar cargas con presencia del variador de velocidad AC4.

Como trabajos posteriores se propone una ampliación en la red y una mayor limitación en cuanto a la función objetivo que igualmente minimize, pero determinando un rango para las potencias que sea consistente con lo que sea favorable para la red.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Cordoba, J. (2017). *Estabilidad de tensión introducción bases matemáticas del análisis métodos de análisis índices y márgenes medidas correctivas*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/10192686/>
- CREG. (1995). *Resolucion 025 de 19* . Colombia: Ministerio de minas y energía.
- Garcia, C. (2014). *Tendencias a largo plazo del sector energia en Colombia*. Colombia: UPME, Ministerio de minas y energía.
- Garcia, C. (2016). *Plan de acción indicativo de eficiencia energética*. Colombia: Ministerio de minas y energía.
- Ingalalli, A., & Bapiraju, J. (2017). *Analytical model for real time simulation of low voltage induction motor drive*. Miami, FL, USA: IEEE.
- Karlsson, D., & Hill, D. (1994). *Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems*. Malmö, Suecia: IEEE.
- Merkle , M., & Miri, A. (2001). *Modelling of industrial loads for voltage stability studies in power systems*. Toronto, Canada: IEEE.
- Piñero, J. (2015). *Control de un motor de induccion usando un variador de frecuencia*. Sevilla : Universidad de Sevilla .
- Rodriguez Garcia, L. F., Pérez Londoño, S. M., & Mora Flórez, J. J. (2013). *Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas*. Pereira, Colombia: Scientia et technica.
- Zomaya, A. (2006). *Handbook of bioinspired algorithms and applications*. New York, USA: Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis group .

## ANEXO