

# Development of a Software Tool for Detection and Location of Faults on a Power Electrical System using the DPL module DIgSILENT PowerFactory

## Desarrollo de una Herramienta Software para la Detección y Ubicación de Fallas en un Sistema Eléctrico de Potencia usando el módulo DPL de DIgSILENT PowerFactory

D. F. Chávez

J. Abad

H. N. Arcos

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador*

*E-mail: diegodch\_9@hotmail.com; jackeline.abad@epn.edu.ec; hugo.arcos@epn.edu.ec*

### *Abstract*

The application of the phasor technology offers new possibilities for monitoring, protection, analysis and control of Electric Power Systems (EPS). In this project, an algorithm is implemented to localize a failure using phasor data, which improves traditional methods. The implemented algorithm distinguishes responses of several linearized models against measurements mode during the transient response after the failure. Based on this, a Maximum Likelihood A-posteriori (MAP) detector is implemented, which uses statistical inference from several hypotheses to determine the probability of a failure from the measurements. The algorithm is implemented in the DPL software module PowerFactory DIgSILENT. The different experiments prove that the developed software is able to distinguish the most likely scenario from a list of possible scenarios. This work uses simulated- scenarios and PMU's measurements.

**Index terms**– Phasor measurement, Localization of failures, Maximum A-posteriori Probability (MAP)

### *Resumen*

La aplicación de la tecnología fasorial ofrece nuevas posibilidades para la supervisión, protección, análisis y control de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). En este proyecto se implementa un algoritmo para la localización de fallas usando datos fasoriales, el cual permitiría mejorar los métodos tradicionales. El algoritmo implementado distingue las respuestas de varios modelos linealizados frente a las mediciones fasoriales ante un transitorio en el SEP. En base a esto, un detector de Máxima Probabilidad A-posteriori (MAP) es implementado, el cual se basa en la inferencia estadística de varias hipótesis que determinan la probabilidad de ocurrencia de falla. El algoritmo se implementa en el módulo DPL del software PowerFactory de DIgSILENT y se realizan distintas pruebas que demuestran la capacidad de la herramienta de software de escoger la hipótesis más probable entre una lista de posibles hipótesis. El trabajo presentado es enteramente realizado en el campo de la simulación, y se emulan datos que se obtendrían de PMUs.

**Palabras clave**– Medición Sincrofasorial, Localización de fallas de SEP, Maximum A-Posteriori Probability (MAP).

Recibido: 24-07-2017, Aprobado tras revisión: 15-11-2017

Forma sugerida de citación: Chávez, D.; Abad, J.; Arcos, H. (2018). “Desarrollo de una Herramienta Software para la Detección y Ubicación de Fallas en un Sistema Eléctrico de Potencia usando el módulo DPL de DIgSILENT PowerFactory”.

Revista Técnica “energía”. No. 14, Pp. 17- 25

ISSN 1390-5074.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones climáticas, diferentes agentes externos, y a la longitud de las líneas de transmisión (L/T), estos elementos son susceptibles a eventos de falla, siendo importante el estudio de este tipo de fenómenos con el objeto de proteger a los diferentes equipos del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y evitar cortes de servicio [1].

La rápida ubicación de un evento de falla ayuda a mejorar los tiempos de restauración del sistema y permite un mejor control en tiempo real de sus efectos. Los operadores de SEP utilizan equipos y sistemas automáticos de protección que incluyen relés que cuentan con algoritmos de localización de fallas en base a cálculos de impedancias de L/T. Sobre la base de estos cálculos, una amplia variedad de algoritmos de detección de falla han sido desarrollados e implementados en varios sistemas eléctricos [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

La ubicación de fallas en L/T realizada por los sistemas de protección es eficaz, aunque susceptible a errores vinculados al ajuste y calibración de los equipos y a tiempos de operación. Por otra parte, el sistema de protección no puede proveer información en tiempo real sobre la variación de los parámetros de la L/T y de las características de carga.

Las unidades de medición fasorial (PMU) actualmente permiten tomar mediciones necesarias para realizar el análisis de la operación de los sistemas eléctricos y de eventos de falla en tiempo real. Las PMUs, son usadas en diferentes sistemas eléctricos alrededor del mundo, ya que permiten obtener datos análogos de voltaje y de corriente sincronizados en un GPS de cualquier parte del sistema eléctrico [9].

En el presente trabajo se ha implementado un algoritmo para la ubicación de fallas en L/T con ayuda de la información simulada para obtener datos de una PMU. El algoritmo aprovecha la dinámica de propagación oscilatoria que resulta de los eventos de falla para lograr la detección de una condición anormal de operación.

Para la ubicación de un evento de falla, el algoritmo hace uso de un detector de Máxima Probabilidad a Posteriori (MAP, Maximum A Posteriori), el cual permite identificar entre varias hipótesis de eventos de falla, la más probable mediante el empleo de una prueba de hipótesis [10].

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta la formulación del problema. La sección III contiene la descripción del algoritmo. En la sección IV se presentan los casos de estudio y sus resultados, para finalmente, en la sección V presentar las conclusiones del trabajo.

## 2. MARCO TEÓRICO

Para el propósito de este estudio, la topología del sistema, incluyendo los parámetros de sus elementos, son conocidos al igual que las condiciones de estado estacionario del sistema. Adicionalmente, se puede establecer una lista completa de posibles eventos de falla de línea, y sus respectivas características de estado estable post-falla a través de un análisis de contingencia.

La ubicación de una falla es determinada mediante el establecimiento de un evento de falla dentro de la lista de fallas posibles. Para el efecto se emplean los datos (emulados) de PMUs reportados una vez despejada la falla. Matemáticamente la solución al problema de ubicación se basa en la modelación lineal del SEP y en la determinación del vector de medición de las PMUs.

El algoritmo de ubicación de falla se fundamenta en un detector de Máxima Probabilidad A-posteriori (MAP). El análisis del detector MAP muestra que el evento de falla se puede identificar mediante la comparación de los datos de medida de las PMU's con las respuestas pronosticadas por el modelo del sistema para cada evento de falla [11].

### 2.1. Planteamiento de Hipótesis

Se consideran  $m$  hipótesis de los posibles eventos de falla, la hipótesis  $H_i$  se vincula a la ocurrencia de un evento de falla en una línea de transmisión de la red eléctrica y cada hipótesis tiene una probabilidad a priori  $p_{Hi}$  donde  $\sum_{i=1}^m p_{Hi} = 1$ .

### 2.2. Modelación del Sistema Eléctrico de Potencia [12], [13]

Para cada evento de falla (hipótesis  $H_i$ ), la dinámica del sistema eléctrico es modelada a través de un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales, esta linealización del modelo de oscilación del SEP permite aliviar considerablemente la carga computacional asociada al modelo de simulación y facilita el desarrollo de una regla de ubicación de falla. A continuación, se detalla el proceso de linealización.

Se utilizará  $x_{(i)}(t)$  para representar al vector de las variables de estado dinámico de la hipótesis  $H_i$  entre las que se incluyen: ángulos de rotor de los generadores ( $\delta$ ), velocidad de generadores ( $\omega$ ), fuerzas electromotrices de los ejes d-q ( $E_d$  y  $E_q$ ), fuerzas electromotrices de sistemas de excitación ( $E_{fd}$ ), dinámica de reguladores de velocidad y dinámica del estabilizadores de potencia (PSS).

El vector  $u_{(i)}$  abarca las variables de entrada del sistema, voltajes y ángulos de las barras del SEP, bajo la hipótesis de estudio  $H_i$ .

La representación del SEP, se la hace mediante un conjunto de  $n$  ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, como se indica a continuación:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

Las variables de salida se pueden expresar en términos de las variables de estado y de las variables de entrada, según:

$$y = g(x, u) \quad (2)$$

Para la linealización del sistema de ecuaciones se considera a  $x_0$  como el vector de variables de estado en condiciones iniciales y  $u_0$  como el vector de variables de entrada medido en el punto de equilibrio para el cual se está analizando la operación del sistema.

Para una operación en equilibrio, se tiene:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (3)$$

Cuando el sistema es sometido a un disturbio, se obtiene:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \Delta x \\ u &= u_0 + \Delta u \end{aligned} \quad (4)$$

De ahí la necesidad de determinar un nuevo estado para satisfacer a la ecuación (1):

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (5)$$

Las funciones no lineales  $f(x, u)$  se pueden representar en expansión de series de Taylor y despreciando los términos que involucran potencias de segundo orden y superiores, se obtiene un sistema lineal del tipo:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u = f(x, u) \quad (6)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u = g(x, u) \quad (7)$$

Las matrices  $A, B, C$  y  $D$  son derivadas parciales de las funciones  $f$  y  $g$  respecto a las variables  $x$  y  $u$  evaluadas en el punto de equilibrio  $x_p$ , mismo que para este estudio es el estado estable de post-falla del sistema.

Las matrices  $A, B, C$  y  $D$ , se obtienen de la siguiente manera:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{pmatrix}$$

donde:

$\Delta x$ : Vector de estado de dimensión  $n$ .

$\Delta y$ : Vector de salida de dimensión  $p$ .

$\Delta u$ : Vector de entrada de dimensión  $r$ .

$A$ : Matriz de estado o de planta, de tamaño  $n \times n$ .

$B$ : Matriz de entrada o de control, de tamaño  $n \times r$ .

$C$ : Matriz de salida, de tamaño  $p \times n$ .

$D$ : Matriz con la relación entre la entrada y salida del sistema, tamaño  $p \times r$ .

Operando las ecuaciones (6) y (7), se obtiene:

$$\Delta \dot{x} = (A - BD^{-1}C)\Delta x = J_s \Delta x \quad (9)$$

Para las desviaciones en estado discreto, se tiene:

$$\Delta x[k] = \Delta x(k\Delta t), \quad (10)$$

donde:

$\Delta t$ : intervalo de tiempo de muestreo en segundos y  $k = 1, 2, \dots$

Las desviaciones se rigen por la ecuación de estado en tiempo discreto, la siguiente expresión permite el estudio de la linealización del sistema en un punto de equilibrio de operación:

$$\Delta x[k + 1] = F \Delta x[k], \quad (11)$$

donde:

$$F = e^{(J_s \Delta t)} \quad (12)$$

Cuando  $k = 0$ , el punto corresponde al primer estado después del despeje de falla.

Además, el vector de estado en el tiempo  $k\Delta t$ , está dado por:

$$x[k] = \Delta x[k] + x_p \quad (13)$$

El tiempo de compensación y la dinámica de pre-compensación dependen de muchos factores como la naturaleza del evento de falla y la configuración de los dispositivos de protección del SEP. Estas incertidumbres se modelarán como un vector aleatorio para cada hipótesis  $x_{(i)}$ [0].

### 2.3. Ubicación de Fallas

Las mediciones realizadas por las PMUs tienen el siguiente modelo:

$$p = L[k] + w[k] \quad (14)$$

Donde  $p$  es la medición de los ángulos de rotor y velocidades angulares de un conjunto de generadores obtenida de las mediciones de las PMUs, después de un proceso de pre-estimación de estas variables. La matriz tiene valores de 0 o 1 los cuales especifican las variables de estado dinámico que se miden;  $y$ ,  $w[k]$  es una matriz de distribución de señal gaussiana de ruido blanco con media cero y una matriz de varianza  $\gamma^2 I$ .

Una forma de decidir qué evento ha ocurrido es elegir la hipótesis con la máxima probabilidad, dados los datos de las PMUs. La técnica de ubicación de la falla que se presenta se basa en un detector de máxima probabilidad a posteriori (MAP). El detector MAP, puede identificar un evento de falla mediante la comparación de los datos medidos por la PMU con las respuestas pronosticadas por el modelo dinámico linealizado para cada evento de falla. El objetivo del detector es decidir entre posibles hipótesis cual es la más probable. En este proyecto, las hipótesis consideradas son:

$$H_i: \text{En la línea } li \text{ ha ocurrido un evento de falla. } \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Cada hipótesis se modela suponiendo que tiene un valor conocido de probabilidad a priori. El detector MAP emplea un enfoque bayesiano para elegir la hipótesis con mayor probabilidad a posteriori. En concreto, la selección  $\hat{H}$  del detector es la hipótesis  $H_i$  si:

$$Pr(H_i|Z) \geq Pr(H_j|Z) \quad \forall j \in 0, \dots, m \quad (15)$$

El esquema de detección MAP requiere una comparación del par secuencial de la probabilidad a posteriori por cada hipótesis. Con el desarrollo algebraico correspondiente, estas comparaciones de probabilidad pueden simplificarse a cálculos simples [11].

En concreto, la regla de decisión para seleccionar entre dos hipótesis  $H_i$  y  $H_j$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & Z(Q_j^{-1} - Q_i^{-1})Z^T - 2Z(Q_j^{-1}v_j^T - Q_i^{-1}v_i^T) \\ & \frac{\hat{H} \neq H_j \geq}{\hat{H} \neq H_i <} 2 \log\left(\frac{p_{H_j}}{p_{H_i}}\right) + v_i Q_i^{-1} v_i^T - v_j Q_j^{-1} v_j^T + \\ & \log(|Q_i Q_j^{-1}|) \end{aligned} \quad (16)$$

donde:

$v_i$ : Vector que contiene las respuestas promedio pronosticadas por el modelo del sistema en el horizonte de tiempo  $k_f$  para el evento de falla  $i$ , para una condición inicial  $\bar{x}_{o(i)}$  considerada después del tiempo de compensación.

$$v_i = O_i(k_f)\bar{x}_{o(i)} - O_i(k_f)x_{p(i)} + \tilde{H}x_{p(i)} \quad (17)$$

$Q_i$ : Representa su correspondiente propagación.

$$Q_i = O_i(k_f)R_{(i)}O_i(k_f)^T + \gamma^2 I \quad (18)$$

$|Q|$ : Representa el determinante de la matriz  $Q$ .

$O_k$ : Matriz de observabilidad por cada hipótesis  $i = 1, \dots, n$ .

$$O_i^T = \left[ H^T \quad F_{(k)}^T H^T \quad \dots \quad (F_{(k)}^{k_f-1})^T H^T \right] \quad (19)$$

$\tilde{I}$ : Matriz con  $k_f$  matrices de identidad ordenada de la siguiente forma:

$$\tilde{I}^T = [I \quad \dots \quad I] \quad (20)$$

La regla de decisión de la ecuación (16) elige la hipótesis más probable entre  $H_i$  y  $H_j$ . Se hacen comparaciones secuenciales en parejas de hipótesis para encontrar la hipótesis más probable dado el conjunto de mediciones.

Por ejemplo, considere tres eventos de falla o hipótesis:  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  y si es más probable que ocurra  $H_1$  que la hipótesis  $H_2$ , de acuerdo con la regla de decisión MAP,  $H_1$  se comparará de nuevo con  $H_3$  y la más probable entre ellas es la hipótesis seleccionada  $\hat{H}$ .

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

En esta sección, se plantea el procedimiento para la ejecución en tiempo real del detector MAP. Para este fin, se describe un algoritmo que indica la secuencia de los cálculos necesarios para implementar el detector.

Para empezar, es necesario definir y enumerar los posibles eventos de falla con sus respectivos valores de probabilidad a priori. Esto no solo permitirá establecer una buena base de datos sobre todos los posibles eventos de falla, sino que permitirá la rápida detección de la falla en tiempo real.

Las condiciones del estado inicial del sistema, requieren de una simulación detallada del SEP antes del despeje de falla utilizando el modelo de oscilación

no lineal. El análisis de contingencia del evento de falla proporciona las condiciones de funcionamiento post-falla necesarias para el algoritmo.

### 3.1. Procedimiento

**Paso 1:** El algoritmo se ejecuta con la indicación de que un evento de falla se desarrolla en una L/T de cualquier parte del sistema. Los eventos de falla se pueden detectar como una caída rápida de las magnitudes de voltaje en las barras del sistema.

**Paso 2:** Se debe determinar todos los posibles eventos de falla que pueden ocurrir en la operación del SEP, cada evento de falla o hipótesis de estudio viene acompañada con su respectivo valor de probabilidad a priori. En total son posibles eventos de falla.

**Paso 3:** Los datos de medición de las PMU's están disponibles desde el instante del despeje de la falla en adelante, se las obtiene en tiempo real para poder hacer uso de esta información en el algoritmo.

**Paso 4:** Se calcula el vector de medición (observación)  $Z$  el cual contiene información de las variables de oscilación dinámica necesarias para poder detectar perturbaciones en el sistema.

**Paso 5:** Se realizan simulaciones para determinar los condiciones de los estados estacionarios frente a cada hipótesis, en este paso se determinan los vectores de las variables de estado  $x$  y vectores de las variables algebraicas  $u$ . Este proceso se repite para todas las posibles hipótesis determinadas en el paso 2.

**Paso 6:** Se procede a calcular las respuestas pronosticadas por el modelo lineal con su correspondiente propagación, vectores  $v_i$  y matrices  $Q_i$ , para cada hipótesis de estudio.

Es necesario mencionar que los pasos 5 y 6 del algoritmo se los pueden realizar fuera de línea.

**Paso 7:** Se procede a implementar la regla de decisión del detector MAP, este esquema de detección requiere de la comparación del par secuencial de la probabilidad a posteriori de cada hipótesis. La regla de detección MAP se implementa secuencialmente para identificar la hipótesis con la máxima probabilidad frente a las mediciones obtenidas de un evento de falla.

**Paso 8:** Una vez realizadas todas las comparaciones, se determina la hipótesis con mayor probabilidad frente a las mediciones de PMU's y por tanto la L/T donde se detectó la falla.

En el diagrama de flujo de la Fig. 1 se resume el procedimiento. El proceso termina y el algoritmo vuelve a ejecutarse las veces que se reporte un evento de falla y se tenga disponibles las mediciones de las PMUs.

Algunas complicaciones pueden aparecer en la aplicación del algoritmo debido a que los eventos de falla en la red pueden producirse en cualquier punto a lo largo de una línea, y también pueden ser muy diversos en su tipo. Por lo tanto, enumerar una lista de posibles eventos de falla puede llegar a ser un desafío. Adicionalmente está la posibilidad de que los eventos de falla no sean en una L/T, por ejemplo, se puede producir fallas en el transformador, generador, etc., lo cual puede complicar el problema de detección. Estas complicaciones están fuera del alcance de este trabajo, por lo que no han sido modeladas dentro del algoritmo.

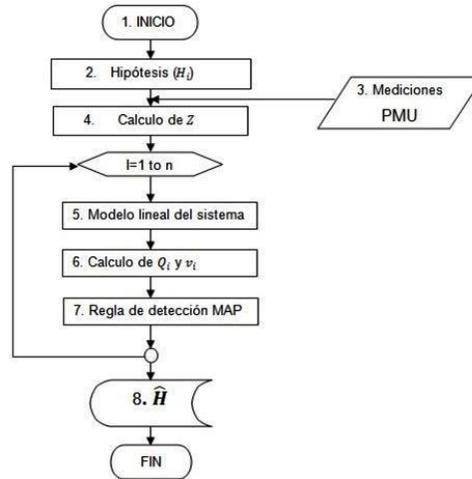


Figura 1: Diagrama de Flujo del Algoritmo

La Fig. 2 detalla el diagrama de flujo de datos (parámetros y mediciones) necesarios para implementar el algoritmo. El detector MAP utiliza las mediciones obtenidas de las unidades sincrofasoriales en el estado de post-falla, además necesita la información de las condiciones de funcionamiento de estado estacionario (de pre-falla  $\bar{x}_0$  y  $x_p$  post-falla necesarios para construir el modelo del sistema) y de la configuración del sistema.

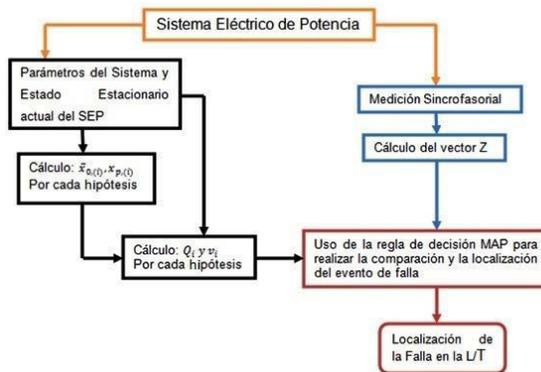


Figura 2: Procedimiento para obtener el Flujo de Datos para el Algoritmo de Localización de Fallas

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo propuesto es utilizado en el sistema eléctrico IEEE 39-BARRAS. El ejemplo de aplicación permite comprobar el funcionamiento de la programación DPL para obtener resultados confiables. El sistema IEEE de 39-BARRAS contiene diez generadores y su base de datos es estructurada en el paquete computacional DIGSILENT (ver fig. 3).

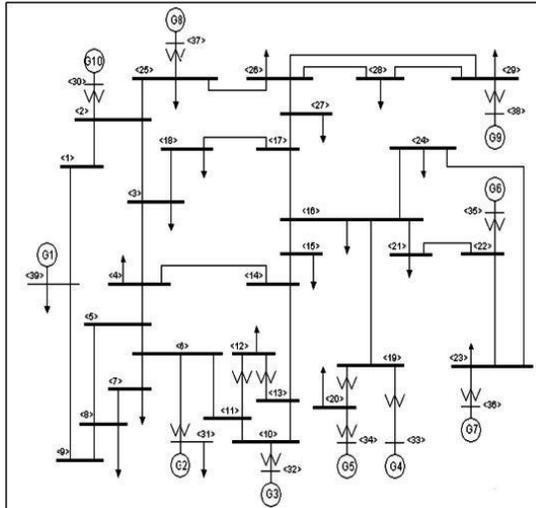


Figura 3: Sistema 39-Barras de la IEEE

Se realizaron simulaciones de diferentes eventos de falla en todas las L/T del sistema, obteniéndose gráficas de las señales de los ángulos del rotor de los generadores con respecto al generador de referencia (G1). En la Fig. 4 se muestra, a modo de ejemplo, un grupo de gráficas correspondientes a los ángulos de rotor del generador G2 para eventos de falla en las líneas: Line 26-29, Line 26-28, Line 28-29, Line 1-2, Line 16-24 y Line 4-14.

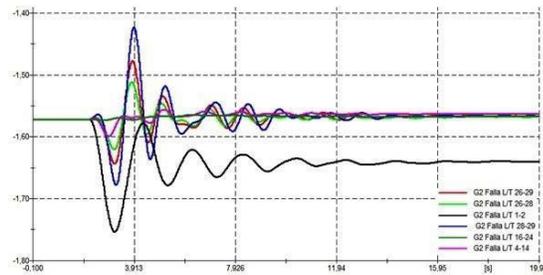
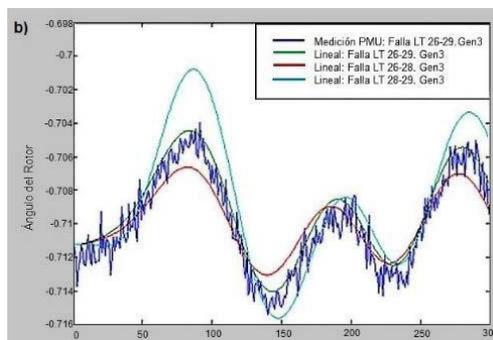
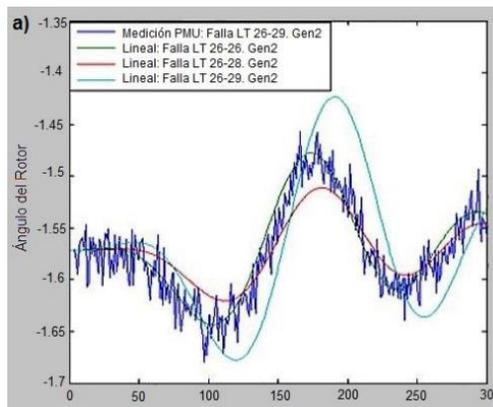


Figura 4: Comparación de la Señal de Ángulo de Rotor del Generador G2 para distintos eventos de Falla

Del análisis de las gráficas de ángulos del rotor, se determina que los resultados para eventos en las líneas: Line 26-29, Line 26-28 y Line 28-29 son muy similares, lo que implica que estas contingencias son más difíciles de ser diferenciadas y detectadas, razón por la cual se utilizaron estos tres eventos para el planteamiento de las hipótesis de estudio.

Se realizan simulaciones detalladas de la dinámica de oscilación del sistema sobre cada evento de falla (hipótesis de estudio), para poder aproximar la información a los datos de medición, para lo cual se implementó el modelo de ecuaciones diferenciales - algebraicas no lineales (DAE) con el modelo de carga de impedancia constante. El modelo DAE utilizado para la simulación, consta de 72 variables de estado (8 variables de estado por cada generador, excepto el generador de referencia), las cuales son: posición angular del rotor  $\delta$ , velocidad angular del rotor  $\omega$ , fuerza electromotriz interna del eje cuadratura del generador  $E_q$ , fuerza electromotriz interna del eje directo del generador  $E_d$ , fuerza electromotriz interna de excitación del regulador  $E_{fd}$ , potencia de la turbina  $P_m$ , dinámica del estabilizador del sistema de potencia (PSS)  $V_m$  y  $V_s$ . El tiempo de despeje de fallas fue aleatorio (uniformemente distribuido entre 6 y 20 ciclos). Se asumió muestreo a 100 Hz; y el ruido con varianza  $\gamma^2 = 0,001$  por unidad (alrededor de 3% de la señal de equilibrio).

Para probar el algoritmo se analiza el caso cuando ocurre el evento de falla en la L/T 26-29 (hipótesis  $H_1$ ). La Fig. 5 muestra las señales de ángulo de rotor justo en el momento del despeje de falla de los nueve generadores, junto con las trayectorias calculadas por los modelos lineales. Para la localización de fallas, el software utiliza los modelos dinámicos lineales correspondientes a diferentes condiciones de falla y mediante las mediciones sincrofásicas se distingue cual hipótesis es la correcta.



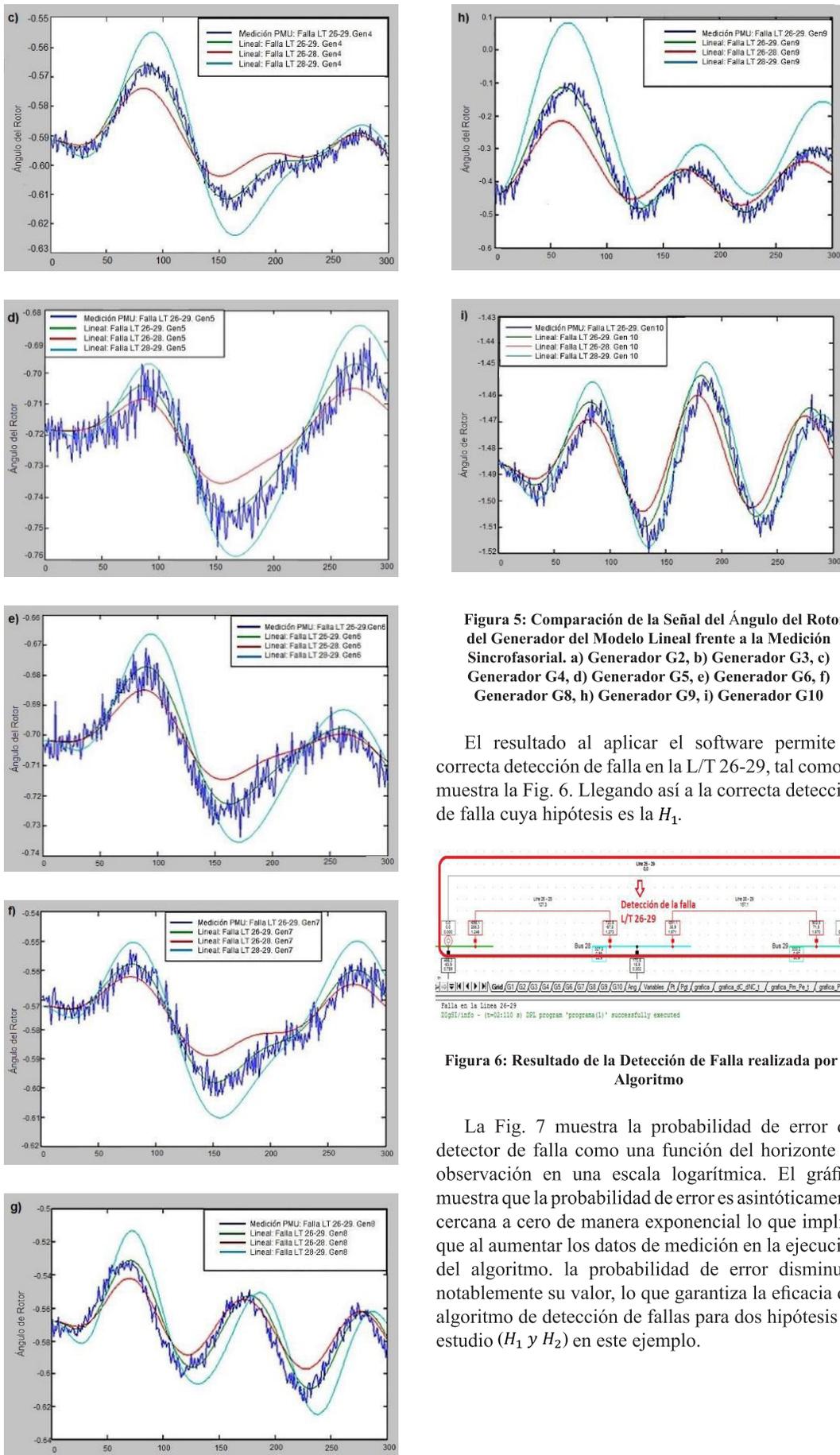


Figura 5: Comparación de la Señal del Ángulo del Rotor del Generador del Modelo Lineal frente a la Medición Sincrofasorial. a) Generador G2, b) Generador G3, c) Generador G4, d) Generador G5, e) Generador G6, f) Generador G8, h) Generador G9, i) Generador G10

El resultado al aplicar el software permite la correcta detección de falla en la L/T 26-29, tal como lo muestra la Fig. 6. Llegando así a la correcta detección de falla cuya hipótesis es la  $H_1$ .

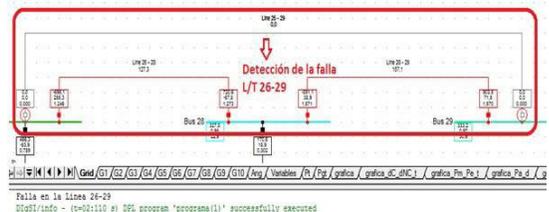


Figura 6: Resultado de la Detección de Falla realizada por el Algoritmo

La Fig. 7 muestra la probabilidad de error del detector de falla como una función del horizonte de observación en una escala logarítmica. El gráfico muestra que la probabilidad de error es asintóticamente cercana a cero de manera exponencial lo que implica que al aumentar los datos de medición en la ejecución del algoritmo, la probabilidad de error disminuye notablemente su valor, lo que garantiza la eficacia del algoritmo de detección de fallas para dos hipótesis de estudio ( $H_1$  y  $H_2$ ) en este ejemplo.

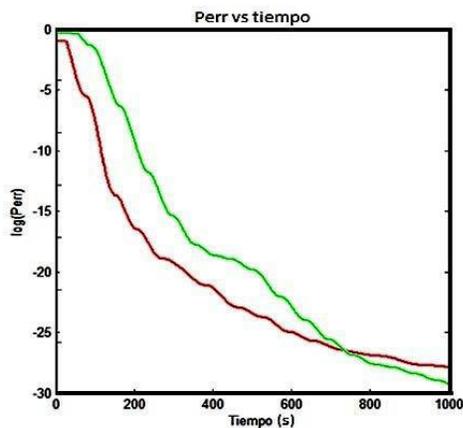


Figura 7: Probabilidad de Error a Escala Logarítmica

## 5. CONCLUSIONES

Cada hipótesis de evento de falla corresponde a una dinámica de oscilación distinta del sistema, puesto que la topología del sistema cambia. La correcta detección del evento de falla se consigue mediante la implementación de la regla de detección de máxima probabilidad a-posteriori (MAP), la cual es capaz de diferenciar cada dinámica mediante un proceso secuencial; este proceso permite elegir la hipótesis más probable entre un listado de posibles eventos de falla.

El algoritmo se probó en el sistema eléctrico estándar IEEE 39-Barras, lográndose ubicar fallas en L/T ante distintas hipótesis. El algoritmo resultó eficaz al momento de detectar y diferenciar entre fallas cuyas señales de ángulos de rotor de los generadores son similares, lo cual podría ser muy difícil de conseguir para algunos sistemas de protección.

La gráfica de probabilidad de error obtenida demuestra la eficacia del detector en distinguir entre las distintas hipótesis de estudio.

El método de detección implementado, el cual utiliza mediciones sincrofásicas para poder obtener datos de la dinámica de oscilación del sistema, resultó ser efectivo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Duncan, M. Sarma y T. Overbye, "Sistemas Eléctricos de Potencia, Análisis y Diseño", Stamford: Ciencias e Ingenierías, 2012.
- [2] L. Zeballos, "Técnicas Modernas para Protección y Monitoreo de Líneas de Transmisión", 2010.
- [3] D. I. D. Chiguano, "Localización de fallas en Líneas Aéreas de Transmisión. Aplicación de un algoritmo digital para Líneas paralelas", Quito: Epn, 2009.

- [4] M. M. Eriksson y G. D. Rockefeller, «An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance resulting from Remote-End Infeed,» IEEE/PES, 1984.
- [5] G. R. Gill y T. T. Owen, «An Accurate Fault Location Estimation for Transmission Line,» IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984.
- [6] H. Kho y H. Khorashdi-Zadeh, «Artificial Neural Network Approach to Fault Classification For Double Circuit Transmission Lines,» IEEE/PES, 2004.
- [7] E. Quintero, "Modelo Adaptivo de Inteligencia Artificial para el Diagnóstico Automático de Fallas a partir de Registros de Osciloperturbografía", Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [8] M. T. Sant y Y. G. Paithankar, "On line Digital Fault Locator for Overhead Transmission Line", IEEE Proceedings, 1979.
- [9] G. J. Araque y R. Barba, "Unidades de medición fasorial - PMU", Quito: CENACE, 2010.
- [10] J. Abad Torres, R. Dhal y S. Roy, «Link-failure detection in network synchronization processes,» IEEE, Texas, 2013.
- [11] J. Valdez, Z. Xun, J. Abad Torres y S. Roy, "Fast Fault Location in Power Transmission Networks using Transient Signatures from Sparsely-Placed Synchrophasors", Washington: IEEE, 2014.
- [12] A. G. Expósito, "Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica", Madrid: McGraw-Hill, 2002.
- [13] P. Kundur, "Power System and Control and Stability", New York: IEEE, 1993.



**Diego Chávez R.-** nació en Quito, Ecuador, en 1990. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2016. Sus áreas de interés son los sistemas eléctricos de potencia, protecciones eléctricas y diseño electro-mecánico de

líneas de transmisión.



**Jackeline Abad Torres.-** (M'15) received the B.S. degree from Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, and the M.S. and Ph.D. degree in electrical engineering from Washington State University, Pullman. She held a Fulbright grant in 2010. She is currently an Assistant

Professor with the Departamento de Automatización y Control Industrial, Facultad de Ingeniería Eléctrica y

Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Her current research interests include structural analysis and controller design of dynamical networks with applications to sensor/vehicle networking, epidemic control, and power systems network control.



**Hugo Arcos M.**- nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan - Argentina en 2005. Actualmente trabaja

en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional de Quito como Profesor a Tiempo Completo. Sus áreas de especialización son máquinas eléctricas, modelación de sistemas de control de generadores y estudios de estabilidad de sistemas de potencia.