

## Comparación Técnica entre los Programas de Simulación de Sistemas de Potencia DIgSILENT PowerFactory y PSS/E

J. Núñez<sup>1</sup>

J. Cepeda<sup>2</sup>

G. Salazar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: jose.carlos.n1989@gmail.com

<sup>2</sup>Centro Nacional de Control de Energía, CENACE

E-mail: jcepeda@cenace.org.ec

### Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) están sujetos a una gran variedad de fenómenos eléctricos y están constituidos por una enorme cantidad de elementos tanto activos como pasivos. Por esta razón, para poder planificar, operar y monitorear un sistema de potencia es necesario contar con programas computacionales que ayuden a simular, de la forma más real posible, los elementos de un sistema de potencia así como también los fenómenos eléctricos a los que están sujetos.

Este trabajo presenta un análisis comparativo entre dos programas de simulación de sistemas de potencia: DIgSILENT PowerFactory y PSS/E. Para esto se utiliza el sistema de prueba IEEE 39 barras, en el cual se realizan simulaciones de: flujos de potencia, cortocircuitos y estabilidad transitoria. Además, se presenta un instructivo para el programa PSS/E para crear un caso de estudio y para los módulos de simulación mencionados anteriormente. Los tiempos de ejecución de cada simulación muestran que el programa PSS/E es más rápido que el programa DIgSILENT PowerFactory para estudios en régimen permanente y régimen transitorio.

**Palabras clave**—DIgSILENT PowerFactory, PSS/E, simulación, estado estable, estado transitorio.

### Abstract

Electrical Power System (EPS) are subjected to a variety of electrical phenomena and are structured by a huge number of both active and passive elements. For this reason, to plan, operate and monitor a power system, it is necessary to use computer programs that help simulating, as realistically as possible, the elements of a power system as well as the different electrical phenomena that take place.

This paper presents a comparative analysis between two simulation power system programs: DIgSILENT PowerFactory and PSS/E. For this purpose, the IEEE 39 bus test system is used to simulate: power flows, short-circuits and transient stability. In addition, an instructive for the PSS/E program is presented to create a case study where the simulation modules mentioned above are tested. The execution time of each simulation shows that PSS / E program is faster than DIgSILENT PowerFactory software for steady-state and transient state studies.

**Index terms**—DIgSILENT PowerFactory, PSS/E, simulation, steady state, transient state.

Recibido: 19-09-2014, Aprobado tras revisión: 21-11-2014.

Forma sugerida de citación: Núñez, J.; Cepeda, J.; Salazar, G. (2015). "Comparación Técnica entre los Programas de Simulación de Sistemas de Potencia DIgSILENT PowerFactory y PSS/E". Revista Técnica "energía". N° 11, Pp. 22-30.

ISSN 1390-5074.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia poseen una gran variedad de componentes que requieren ser modelados de una forma adecuada. En este sentido, es importante conocer cómo modelar de forma matemática cada uno de los componentes de un sistema de potencia, esto con el objetivo de que, mediante programas computacionales, se simule su comportamiento de la forma más real posible. Así, mediante estos modelos matemáticos se pueden realizar diferentes tipos de estudios eléctricos. El Centro Nacional de Control de Energía CENACE, es el organismo encargado de operar el Sistema Nacional Interconectado (SNI). Dentro de sus funciones está planificar y ejecutar la operación del SNI, es por esto que utiliza programas computacionales de simulación de sistemas de potencia. En la actualidad cuenta con las licencias de los programas PowerFactory de DlgSILENT y PSS/E.

Debido a que cada software posee su propia arquitectura, y dispone de sus propios algoritmos de simulación e integración, los resultados que se obtienen de las simulaciones pueden variar. Adicionalmente debido a las diferencias estructurales, las funcionalidades de cada uno, así como los tiempos de ejecución de las rutinas, pueden ser distintos. Por este motivo, se necesita un estudio comparativo entre estos dos programas para poder conocer sus características técnicas, sus ventajas y desventajas para la ejecución de los diferentes estudios eléctricos, así como también para poder determinar las posibles opciones de complementación entre estos dos programas [1].

Este trabajo presenta los resultados de simulaciones de: flujos de potencia, cortocircuitos y estabilidad transitoria realizados en los dos programas. Mediante estos resultados y analizando las cualidades técnicas de cada programa, se realiza una evaluación de los modelos matemáticos que utiliza cada programa, para realizar los diferentes estudios eléctricos, determinando así sus ventajas y desventajas. Además se realiza un resumen básico de los pasos a seguir para realizar las simulaciones anteriormente mencionadas en el programa PSS/E.

### 1. PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SEP

#### 1.1. La Máquina Síncrona

La máquina síncrona es el elemento más importante de un sistema de potencia, ya que se encarga de transformar la energía mecánica en energía eléctrica que se transmite a la red eléctrica [2]. Las partes principales de una máquina síncrona son el estator que es la parte fija y el rotor que es la parte móvil. El rotor puede ser cilíndrico o de polos salientes, en éste se encuentra el devanado de

campo que es alimentado por una fuente de corriente continua, la cual crea una fuerza magneto motriz que se combina con la generada por la corriente que circula en el devanado de armadura que se encuentra en el estator, el flujo resultante en el entre hierro induce un voltaje en el devanado de armadura [3].

El modelo dinámico de la máquina síncrona, es decir su ecuación de oscilación se detalla en la sección 3.3.1 de este trabajo.

#### 1.2. El Transformador

El transformador es otro de los elementos importantes de un sistema de potencia, este elemento es el encargado de enlazar los sistemas de generación con los sistemas de transmisión, enlaza además sistemas que tienen diferentes niveles de voltajes, los transformadores de potencia poseen cambiadores de tomas (taps) que modifican la relación de transformación con lo cual se puede variar el flujo de potencia reactiva en los devanados del transformador, para así regular los perfiles de los voltajes en el sistema de potencia [4].

#### 1.3. La Línea de Transmisión

Las líneas de transmisión son las encargadas de transportar la potencia desde las centrales de generación hasta las subestaciones de recepción, una línea de transmisión debe de transmitir la potencia de la forma más económica posible [5]. Si se supone que una línea de transmisión trabaja con una carga trifásica balanceada se la puede representar matemáticamente como si fuera un sistema monofásico. Dependiendo la longitud de la línea de transmisión se puede considerar los siguientes casos:

Si la línea de transmisión es corta es decir si su longitud es menor a los 80 km, se la representa únicamente con una impedancia serie a través de su resistencia e inductancia [3].

Si la línea de transmisión tiene una longitud entre 80 y 240 km se la representa con una impedancia en serie pero además se toma en consideración el efecto capacitivo por lo que éste modelo presenta una admitancia en el extremo receptor e emisor de un valor igual a la mitad de su admitancia total, se denomina el modelo  $\pi$  de una línea de transmisión [3].

Una línea de transmisión se la considera de longitud larga cuando tiene más de 240 km, la representación matemática se la realiza tomando en consideración que los parámetros de la línea están distribuidos uniformemente [3].

#### 1.4. Las Cargas [2]

La carga es uno de los parámetros más difíciles de evaluar en un sistema de potencia, ya que cambia

continuamente, por esta razón es que se convierte en un problema estadístico.

Existen básicamente tres formas de representar a las cargas de un sistema de potencia, estas son:

- Potencia constante, esta forma de representación se usa especialmente para realizar estudios de flujos de potencia, donde permanece constante la potencia de la carga.
- Corriente constante, la corriente de la carga permanece constante y se la obtiene de la relación entre su potencia y voltaje.
- Admitancia constante, esta forma de representar se la utiliza cuando se realiza estudios de estabilidad transitoria, la impedancia de la carga se la determina con la relación de su voltaje al cuadrado y la potencia de la misma.

## 2. ESTUDIOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Para que los Sistemas Eléctricos de Potencia operen de forma adecuada y dentro de sus límites permitidos, es necesario realizar diferentes tipos de estudios. En este trabajo se analizan específicamente y de manera breve los siguientes tipos de estudios: Flujos de Potencia, Estudios de Cortocircuitos y Estudios Dinámicos. Este último tipo de estudio se realiza mediante simulaciones en el dominio del tiempo y se refiere específicamente a la estabilidad transitoria.

### 2.1. Flujos de Potencia

Un estudio de flujos de potencia es de gran importancia, para la planeación y expansión futura de los sistemas de potencia. La información más relevante que se obtiene son los valores de la magnitud y al ángulo de fase de los voltajes en cada una de las barras del sistema. A partir de estos valores se pueden obtener más magnitudes del sistema como los flujos de potencia activa y reactiva por los elementos del sistema.

#### 2.1.1. Método de Newton-Raphson [6]

Este método realiza sus cálculos mediante linealizaciones sucesivas de las ecuaciones involucradas, expresadas como  $f(x)=0$ .

En este caso, las funciones o residuos a anular son la diferencia entre los valores de potencia calculados y los especificados.

En cada iteración se debe resolver el sistema lineal de ecuaciones que se muestra en (1).

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k. \quad (1)$$

La matriz de coeficientes se denomina Jacobiano, una vez resuelto el sistema, los voltajes se actualizan como se muestra en (2).

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k. \quad (2)$$

El proceso termina cuando todos los componentes del vector de residuos  $[\Delta P|\Delta Q]$  son suficientemente pequeños.

## 2.2. Cortocircuitos

Un estudio de cortocircuitos es muy importante en un sistema eléctrico de potencia, ya que mediante este tipo de estudio, se puede seleccionar y dimensionar los interruptores que van a proteger a los distintos elementos que componen el sistema. Además, es importante porque permite realizar una adecuada coordinación de protecciones.

### 2.2.1. Fallas simétricas [5]

Las fallas simétricas son cortocircuitos trifásicos balanceados, en este tipo de cortocircuitos no se requiere del conocimiento y uso de componentes simétricas.

La intensidad de la falla una barra  $i$  de un sistema de potencia se calcula como se muestra en (3).

$$I_{fi} = \frac{V_i^0}{Z_{ii} + Z_f}. \quad (3)$$

Donde  $Z_{ii}$  es elemento de la diagonal de la matriz de impedancias  $Z_{barra} = Y_{barra}^{-1}$ . Cada término  $Z_{ii}$  se interpreta como la impedancia equivalente de la red vista desde la barra  $i$ , en otras palabras es la impedancia de Thevenin en el punto de la falla.

### 2.2.2. Fallas asimétricas

Una falla asimétrica ocurre cuando la participación de las tres fases del sistema no es equilibrada. Entre este tipo de fallas se encuentran: fase-tierra, fase-fase, fase-fase-tierra, apertura de una fase y apertura de dos fases [6]. Este tipo de fallas requiere la aplicación del teorema de las componentes simétricas para poder solucionar el problema.

De acuerdo con el teorema de Fortescue [3], tres fasores balanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores.

Los conjuntos balanceados de componentes son: *componentes de secuencia positiva*  $V_1$ , *componentes de secuencia negativa*  $V_2$  y *componentes de secuencia cero*  $V_0$ .

Los modelos de secuencia de los principales componentes de un sistema de potencia son de gran importancia para el estudio y análisis de fallas asimétricas, se pueden revisar [2] y [3] para conocer más detalladamente cómo se obtienen estos modelos de secuencia tanto de generadores, transformadores, líneas de transmisión, etc.

La falla monofásica de línea a tierra es originada por descargas atmosféricas o por los conductores que hacen contacto con las estructuras (Torres de Transmisión). Esta es la falla es la más común en un sistema de potencia. También pueden ocasionarse fallas de línea a línea y fallas línea a línea tierra. Los detalles de los cálculos de cortocircuitos pueden encontrarse en [2] y [3].

### 2.3. Estabilidad en los Sistemas de Potencia

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad que posee para regresar a la operación normal o estable después de haber sido sometido a algún tipo de perturbación como por ejemplo un cortocircuito [2]. La estabilidad de un sistema de potencia se puede clasificar principalmente en tres ramas, que son: estabilidad de ángulo, estabilidad de frecuencia y estabilidad de voltaje. La estabilidad de ángulo puede ser estabilidad oscilatoria de pequeña señal o estabilidad transitoria de gran señal [7], este trabajo se centra en la estabilidad de ángulo transitoria.

La estabilidad transitoria estudia la capacidad que tienen los generadores para seguir funcionando en sincronismo tras la ocurrencia de una gran perturbación. La estabilidad transitoria es un problema de gran perturbación por lo que las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del sistema no se pueden linealizar [6]. Por esta razón, la solución matemática de este tipo de fenómenos involucra realizar métodos de integración numérica para resolver las ecuaciones algebraico-diferenciales.

#### 2.3.1. Ecuación de oscilación de la máquina sincrónica [7]

La ecuación de oscilación de una máquina sincrónica describe el comportamiento dinámico de la máquina. La variable de salida de esta ecuación es el ángulo eléctrico del rotor y los parámetros son la constante de inercia  $H$ , velocidad angular, la potencia mecánica y potencia eléctrica, su ecuación se muestra en (4).

$$\frac{2H}{\omega_r} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e(\delta). \quad (4)$$

#### 2.3.2. Solución numérica de la ecuación de oscilación [7]

Las ecuaciones diferenciales a ser resueltas en un análisis de estabilidad de sistemas de potencia son ordinarias no-lineales con valores iniciales conocidos. Estas ecuaciones se deben resolver a través de un análisis de integración numérica. Los métodos más conocidos para resolver este tipo de ecuaciones son tres: el método paso a paso, el método de Euler y el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

El método paso a paso es el más fácil de desarrollarlo, este método supone que la potencia acelerante que se calcula al inicio de un intervalo es constante desde la mitad del intervalo que le precede hasta la mitad del intervalo considerado, también se supone que la velocidad angular es constante a lo largo de un intervalo.

El método de Euler se basa en la derivada de una función en un punto determinado de operación. Este método es equivalente a utilizar los dos primeros términos de la expansión de las series de Taylor.

El método de Runge-Kutta es el método más exacto en la solución de ecuaciones diferenciales no lineales, este método calcula el valor de la incógnita al final del intervalo en función de un valor conocido al inicio del intervalo, y de un promedio ponderado entre dicho valor y el valor para puntos intermedios, estas suposiciones permiten que el intervalo de integración sea mayor, lo cual reduce el número de veces de resolución de la ecuación.

### 3. INTRODUCCIÓN A LOS PROGRAMAS DigSILENT PowerFactory y PSS/E

A continuación se detallan brevemente las características principales de cada uno de los programas.

#### 3.1. DigSILENT PowerFactory

DigSILENT PowerFactory es un software de simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia, que permite realizar diversos tipos de estudios eléctricos. En la actualidad este software es utilizado por entidades del sector eléctrico ecuatoriano como CENACE y TRANSELECTRIC. Estas empresas utilizan este software para realizar diferentes estudios eléctricos con lo cual obtienen la información técnica necesaria para llevar a cabo sus funciones.

### 3.1.1. Funciones de simulación [8]

DIgSILENT PowerFactory incorpora una gran variedad de funciones de simulación que se listan a continuación: Flujos de Potencia, Análisis de fallas, Análisis de redes de bajo voltaje, Optimización de redes de distribución, Simulación Dinámica, Simulación de Transitorios Electromagnéticos, Análisis Modal, Análisis de Protecciones, Análisis de Armónicos, Análisis de Confiabilidad, Análisis de Estabilidad de Voltaje, Análisis de Contingencias, Modelado de dispositivos electrónicos de potencia, Compatibilidad con otros softwares de simulación como PSS/E y Flujo de Potencia Óptimo (OPF).

Además de tener las diferentes funciones de simulación que se mencionaron anteriormente DIgSILENT PowerFactory incorpora dos lenguajes de programación: i) DPL (DIgSILENT Programming Language) que permite realizar nuevas funciones de simulación y diferentes tipos de aplicaciones; ii) DSL (DIgSILENT Simulation Language) que permite crear nuevos componentes dinámicos para la simulación de estabilidad transitoria.

### 3.1.2. Compatibilidad [8]

DIgSILENT PowerFactory es compatible con una gran variedad de programas de simulación como: PSS/E, PSS/U, NEPLAN, entre otros. Si se desea conocer cómo realizar la importación de archivos desde el programa PSS/E hacia DIgSILENT y viceversa se puede revisar el proyecto de titulación en el cual está basado este trabajo [1].

## 3.2. PSS/E

PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*) es un software para la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia en condiciones de régimen estacionario y dinámico. Una característica de PSS/E es la capacidad que posee para manejar sistemas con un gran número de elementos, así por ejemplo: las actividades de flujo de potencia pueden manejar casos hasta 150000 barras, 300000 cargas, 26840 barras de generación, 33050 generadores, 300000 líneas y 60000 transformadores [9].

### 3.2.1. Funciones de simulación [10]

El software PSS/E permite realizar una variedad de simulaciones, sus funciones más relevantes son: flujo de potencia, análisis de contingencias, despacho económico, flujo óptimo de potencias (OPF), análisis de fallas, reducción de redes, estudios de estabilidad dinámica, estudios lineales de red, etc.

Una de las grandes cualidades de este software es su forma de trabajar automáticamente, ejecutando secuencialmente un conjunto de actividades, mediante la utilización del lenguaje de programación de PSS/E, IPLAN y desde la versión 30, también se puede utilizar el lenguaje de programación PYTHON.

### 3.2.2 Archivos de PSS/E [10]

El software PSS/E requiere, para trabajar, diferentes tipos de archivos. La información relativa a la topología del sistema y características técnicas de los elementos de la red como por ejemplo: barras, líneas, cargas, generadores, etc. se guarda en un archivo de texto *.raw* o en archivos binarios *.sav*, los archivos binarios requieren menor espacio de memoria; el diagrama unifilar de la red se almacena en un archivo *.sld*. Cuando se desee realizar un estudio de fallas es necesario incorporar la información de las impedancias de secuencia de la red en un archivo *.seq*.

Si se dispone de la información de los componentes dinámicos como reguladores de velocidad, reguladores de voltaje, etc. esta información se almacena en archivos con la extensión *.dyr*. Estos archivos en general tienen un formato de texto con información de entrada para el software PSS/E, y se pueden crear externamente utilizando cualquier editor de texto.

## 4. INSTRUCTIVO PARA EL PROGRAMA PSS/E

A continuación se realiza una breve explicación de cómo crear un caso de estudio nuevo en el programa PSS/E. También se explican los pasos para realizar los diferentes tipos de simulaciones que se mencionaron anteriormente, mayores detalles acerca de este instructivo se encuentran en [1]. Con este propósito, se usa como ejemplo el sistema de prueba IEEE 39 barras [11] cuyo diagrama unifilar se muestra en la Fig. 1.

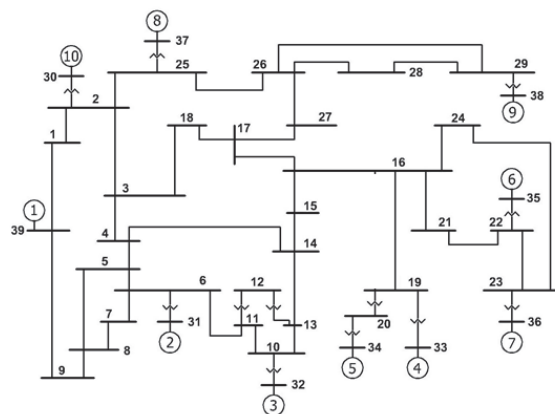


Figura 1: Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE 39 barras [11]

#### 4.1. Creación de un Caso Nuevo

Para crear un caso nuevo, se selecciona en la barra de menús la opción File y se da click en la pestaña *New* con lo que aparece un cuadro de diálogo en el cual se elige la opción Network case and Diagram. También se puede realizar este procedimiento directamente de la barra de herramientas dando un click en el botón New Case/Diagram. Una vez realizado este procedimiento aparece una hoja de trabajo donde se deben ingresar los componentes del sistema, como generadores, transformadores, líneas de transmisión cargas etc.

#### 4.2. Simulación de Flujos de Potencia

Para obtener la solución del flujo de potencia del caso en estudio, se selecciona la opción Solve en el menú Power Flow del submenú Solution. Alternativamente se puede dar click en el botón Solve de la barra de herramientas, aparecerá después un cuadro de diálogo donde se pueden elegir los distintos tipos de algoritmos: Newton-Raphson completo (FNLS), Newton-Raphson desacoplado (NSOL), Newton-Raphson desacoplado rápido (FDNS), Gauss-Seidel (SOLV) y Gauss-Seidel modificado (MSLV). También se puede aplicar diferentes opciones durante el proceso de resolución como por ejemplo: ajustar los taps y el ángulo de fase de los transformadores (Tap adjustment y Adjust phase shift, o Adjust taps), controlar el intercambio de potencia entre las áreas (Area interchange control), considerar los límites de potencia reactiva de los generadores (VAr limits o Ignore VAr limits), aplicar un perfil plano en los voltajes como estado inicial (Flat start), efectuar el ajuste de taps de corriente continua (Adjust DC taps), una vez que se hayan marcado las opciones deseadas por el usuario, se da click en el botón Solve y el programa resuelve el flujo de potencia.

#### 4.3. Simulación de Fallas

Para realizar un cálculo típico de un cortocircuito en PSS/E, se selecciona la opción Solve and report network with unbalances (SCMU/SCOP), del menú Fault. Mediante esta opción se puede elegir el tipo de falla a realizar, que puede ser: falla monofásica a tierra, bifásica, bifásica a tierra, trifásica, se pueden realizar en las barras o en las líneas del sistema, etc.

Mediante el menú Fault también se pueden realizar cálculos de cortocircuitos aplicando las consideraciones de las normas IEC 60909 y las normas ANSI.

#### 4.4. Simulación de Dinámica

Como primer paso para realizar una simulación dinámica se deben abrir los datos dinámicos del sistema ubicados en el archivo .dvr. Luego se deben determinar las condiciones iniciales para la simulación, convirtiendo las cargas y los generadores a sus modelos de impedancias y equivalentes de Thevenin respectivamente.

El segundo paso importante para realizar la simulación es configurar las variables que se deseen calcular, las cuales pueden ser: los ángulos de los generadores, la potencia, el voltaje, etc. Esto se lo realiza a través del menú Dynamics del submenú Define simulation output (CHAN). Se debe también configurar las opciones de simulación a partir del submenú Simulation options en el cual se puede elegir la dependencia de la red con la frecuencia, y se puede elegir la referencia para el cálculo de los ángulos de los rotores de los generadores, entre otras opciones más.

A través del menú Disturbance se puede aplicar diferentes tipos de perturbaciones al sistema, como por ejemplo fallas en una línea o en una barra, conexión y desconexión de generación y cargas, entre otras opciones más.

Mediante el submenú Simulation se selecciona la opción Perform simulation (STRT/RUN) donde se puede inicializar las condiciones de los elementos dinámicos del sistema, así como también realizar la simulación para el tiempo que se desee.

Una explicación más detallada de este instructivo se encuentra [1].

### 5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

En esta sección del artículo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en cada programa. Además, se presentan los tiempos de ejecución de las simulaciones de cada programa.

#### 5.1. Análisis de los Resultados de Flujos de Potencia

La Tabla 1 muestra los valores de los voltajes y los ángulos de fase en cada una de las barras del sistema.

Tabla 1: Voltajes y ángulos de fase en las barras del sistema

BARRA	DIgSILENT PowerFactory		PSS/E	
	Voltaje [p.u.]	Angulo [deg]	Voltaje [p.u.]	Angulo [deg]
1	1,047	-8,469	1,047	-8,467
2	1,049	-5,785	1,049	-5,784
3	1,030	-8,630	1,030	-8,630
4	1,004	-9,636	1,004	-9,636
5	1,005	-8,636	1,005	-8,636
6	1,008	-7,973	1,008	-7,973
7	0,997	-10,148	0,997	-10,148
8	0,996	-10,639	0,996	-10,639
9	1,028	-10,347	1,028	-10,348
10	1,017	-5,456	1,017	-5,456
11	1,013	-6,314	1,013	-6,314
12	0,994	-6,286	0,994	-6,286
13	1,014	-6,127	1,014	-6,127
14	1,011	-7,687	1,011	-7,687
15	1,015	-7,770	1,015	-7,769
16	1,031	-6,222	1,031	-6,221
17	1,033	-7,335	1,033	-7,334
18	1,031	-8,257	1,031	-8,256
19	1,050	-1,056	1,050	-1,055
20	0,991	-2,048	0,991	-2,047
21	1,031	-3,815	1,031	-3,815
22	1,049	0,635	1,049	0,636
23	1,044	0,437	1,044	0,437
24	1,037	-6,102	1,037	-6,102
25	1,057	-4,396	1,057	-4,395
26	1,052	-5,560	1,052	-5,559
27	1,038	-7,529	1,038	-7,528
28	1,050	-2,048	1,050	-2,047
29	1,050	0,712	1,050	0,713
30	1,048	-3,372	1,048	-3,372
31	0,982	0,000	0,982	0,000
32	0,983	2,530	0,983	2,530
33	0,997	4,162	0,997	4,162
34	1,012	3,142	1,012	3,142
35	1,049	5,588	1,049	5,588
36	1,064	8,292	1,064	8,292
37	1,028	2,389	1,028	2,390
38	1,027	7,775	1,027	7,776
39	1,030	-10,079	1,030	-10,081

El algoritmo de solución que se utiliza es el de Newton-Raphson completo. Como se puede observar los resultados son similares, presentándose diferencias del orden de 0,017%, principalmente en los resultados de los ángulos de fase. El tiempo promedio que requiere el programa DIgSILENT para la simulación es de 0,145 segundos, mientras que el programa PSS/E requiere un tiempo de 0,065 segundos.

### 5.2. Análisis de los Resultados de Cortocircuitos

En este caso, se realiza un cortocircuito trifásico en la barra 16 del sistema, los resultados de la intensidad de la corriente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de la intensidad de la corriente de cortocircuito

BARRA	DIgSILENT PowerFactory		PSS/E	
	Corriente [kA]	Angulo [deg]	Corriente [kA]	Angulo [deg]
16	15,202	-83,120	15,123	-86,240

En este caso los valores ya no son tan similares, presentándose diferencias de un 0,519% para el caso de la corriente de cortocircuito y 3.754% para el ángulo de fase, esto se debe a que el programa PSS/E simula un cortocircuito trifásico con la combinación de una falla monofásica a tierra y una falla bifásica a tierra. El programa PSS/E requiere un tiempo promedio de 0,142 segundos para realizar la simulación del cortocircuito, mientras que el programa DIgSILENT requiere un tiempo de 0,194 segundos.

### 5.3. Análisis de los Resultados de Estabilidad Transitoria

El estudio de estabilidad transitoria se lo realizó tomando en consideración una falla trifásica en la línea 28-29 del sistema. Se determinó el tiempo crítico de despeje de falla en los dos programas en estudio, en el programa DIgSILENT PowerFactory se obtuvo un tiempo crítico de despeje de falla de 0.0702 segundos, mientras que el programa PSS/E se obtuvo un tiempo de 0.07 segundos. El intervalo de integración que se utilizó en los dos programas fue de 0.001 segundos. La Fig. 2 muestra las oscilaciones de los ángulos de los generadores en el programa DIgSILENT PowerFactory.

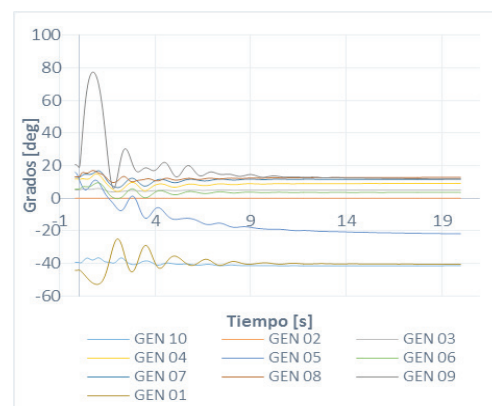


Figura 2: Oscilación de los ángulos de los generadores en DIgSILENT PowerFactory

La Fig. 3 muestra la oscilación de los ángulos de los generadores en el programa PSS/E.

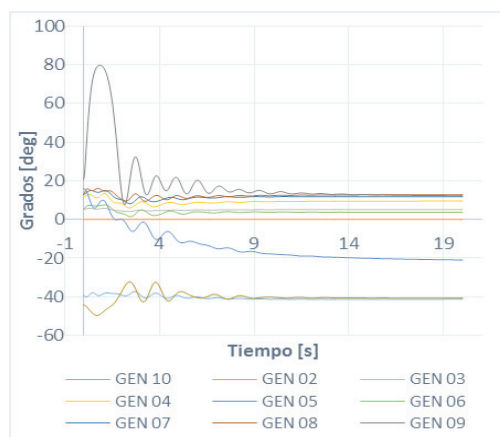


Figura 3: Oscilación de los ángulos de los generadores en PSS/E

El generador que presenta la mayor oscilación es el generador 09 que se encuentra en la barra 38, esto debido a que se encuentra cerca de la línea fallada. La Fig. 4 muestra la oscilación del generador 09 en los dos programas.

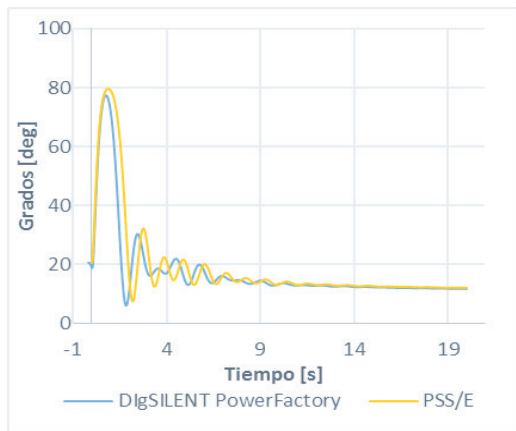


Figura 4: Oscilación del ángulo del generador 09

Como se puede observar, las oscilaciones que se obtienen en los dos programas son bastantes parecidas; sin embargo, se aprecia que los resultados de PSS/E presentan un comportamiento menos amortiguado que los de PowerFactory. Para el cálculo de estos ángulos se ha tomado como referencia a la máquina 02 que se encuentra en la barra de slack. En cuanto a los tiempos de simulación el programa DgSILENT PowerFactory realiza la simulación en un tiempo promedio de 7,755 segundos, mientras que el programa PSS/E lo realiza en un tiempo promedio de 1,787 segundos.

La diferencia que se obtiene en las oscilaciones del ángulo se debe a los algoritmos que utiliza cada programa para la integración numérica, el programa PSS/E utiliza el algoritmo de Euler de segundo orden [12], mientras que el programa DgSILENT utiliza el método de Runge-Kutta [8].

Para realizar un estudio de estabilidad es necesario tener una referencia para calcular los ángulos de los generadores. Una opción es usar como referencia el ángulo del generador de la barra *slack*. De hecho, PowerFactory usa este tipo de referencia para el cálculo, además puede calcular la máxima desviación del ángulo del rotor de los generadores escogiendo del listado de variables de cada generador la opción *dfrotx*, permite también obtener el ángulo del rotor con referencia a la barra local de voltaje, o con referencia al ángulo del generador de referencia. Todos estos cálculos los realiza siempre considerando la referencia el ángulo del generador de la barra *slack*.

El programa PSS/E por su parte tiene tres maneras diferentes de referenciar los ángulos para realizar un estudio dinámico, estas son:

- Relativo a un generador del sistema.
- Relativo con un ángulo promedio del sistema, y
- Relativo al ángulo promedio ponderado.

La primera opción permite escoger cualquiera de los generadores del sistema como máquina de referencia. En los análisis que se realizaron anteriormente se escogió esta opción donde se tomó como referencia al generador dos que está conectado en la barra *slack*. Esto, con el propósito de realizar la comparación con PowerFactory.

La segunda opción calcula los ángulos de los generadores tomando como referencia un promedio de todos los ángulos de los generadores del sistema.

La tercera y última opción permite determinar los ángulos de los generadores tomando como referencia un ángulo promedio ponderado, donde es importante el peso que tiene cada ángulo en el sistema.

La Fig. 5 muestra la oscilación del ángulo del generador 09, tomando como referencia las tres posibles alternativas que presenta PSS/E, también se incluye la oscilación que se obtiene con el programa DgSILENT PowerFactory. Como se puede observar cuando se toma como referencia el ángulo promedio ponderado del sistema hay un intervalo de desplazamiento en las condiciones iniciales de este generador, también se observa que la forma de la oscilación es mucho más parecida a la oscilación que se obtiene con PowerFactory.

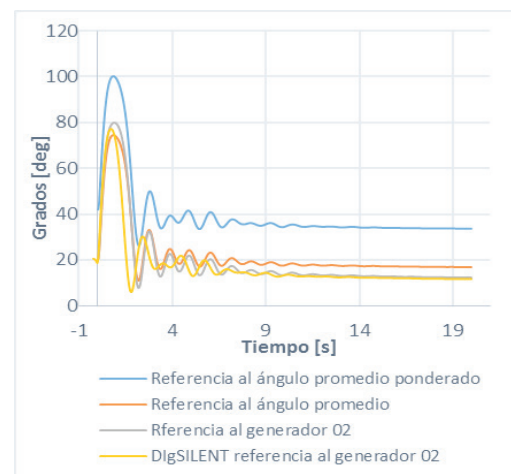


Figura 5: Oscilación del ángulo del generador 09 con varias referencias

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las simulaciones en estado estable y estado transitorio tienen un menor tiempo de ejecución en el programa PSS/E, esto se debe a que los algoritmos que utilizan cada uno de los programas son diferentes y están estructurados de tal forma que en el caso de PSS/E realiza las simulaciones en un tiempo mucho menor que en PowerFactory.



El programa DIgSILENT PowerFactory posee en su biblioteca una mayor cantidad de elementos como modelos de: generadores, transformadores, motores, dispositivos de electrónica de potencia, reguladores de voltaje, estabilizadores de potencia entre otros elementos que son indispensables para realizar las simulaciones.

El programa PSS/E permite automatizar sus simulaciones mediante la ejecución de diferentes tipos de comandos, esto es muy útil ya que se puede realizar las simulaciones en menor tiempo y de forma más eficiente.

La solución de la ecuación de oscilación de la máquina sincrónica para estudios de estabilidad transitoria depende del tipo de algoritmo de integración numérica que se utilice, en este caso PowerFactory utiliza el método de Runge-Kutta el cual tiene una gran precisión, mientras que PSS/E utiliza el método de Euler de segundo orden el cual posee una precisión menor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Núñez López, Comparación Técnica entre los Programas de Simulación de Sistemas de Potencia
- [2] D. P. Kothari y I. J. Nagrath, Sistemas Eléctricos de Potencia, México, D.F.: McGraw-Hill, 2008.
- [3] J. Grainger y W. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, México, D.F.: McGraw-Hill, 1996.
- [4] C. Gallardo, Análisis de Sensitividad en SEP, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [5] R. Canelos, Diseño de Líneas de transmisión de Alta Tensión, Presentación de una LT, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [6] A. Gómez, J. Martínez, J. Rosendo, E. Romero y J. Riquelme, Sistemas Eléctricos de Potencia Problemas y Ejercicios Resueltos, Madrid: Prentice Hall, 2003.
- [7] C. Gallardo, Estabilidad de Sistemas de Potencia, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [8] DIgSILENT GmbH, *PowerFactory User's Manual*, Gomarigen, Germany, 2008. DIgSILENT PowerFactory y PSS/E, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [9] M. I. Zamora, A. I. Mazón, E. Fernández, K. J. Sagastabeitia, I. Albizo, E. Eguía y V. Valverde, Simulación de Sistemas Eléctricos, Madrid: Pearson Educación, 2005.
- [10] Siemens Industry, Inc., *PSS/E 33.4 Program Operation Manual*, Schenectady, NY: Siemens Power Technologies International, 2013.
- [11] J. C. Cepeda Campaña, *Evaluación de la Vulnerabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia en Tiempo Real Usando Tecnología de Medición Sincrofasorial*, San Juan, Argentina, 2013.
- [12] Siemens Industry, Inc., *Program Application Guide Volume 1 and 2*, Schenectady, NY: Siemens Power Technologies International, 2013.



**José Carlos Núñez.-** Nació en la ciudad de Ambato en 1989. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional Bolívar y sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, actualmente se encuentra realizando su proyecto de titulación para obtener el título de Ingeniero Eléctrico. Sus áreas de interés son: La Estabilidad en Sistemas de Potencia y Confiabilidad de SEP.



**Jaime Cristóbal Cepeda.-** Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005 y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2013. Entre 2005 y 2009 trabajó en Schlumberger y en el CONELEC. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente se desempeña como jefe de Investigación y Desarrollo del CENACE. Sus áreas de interés incluyen la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



**Gabriel Salazar Yépez.-** Ingeniero Eléctrico por la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador. Doctor en Ingeniería por el Instituto de Eléctrica de la Universidad de San Juan, Argentina. Se ha desempeñado como: Coordinador de Investigación y Desarrollo del Centro Nacional de Control de Energía, Ecuador, Director de Tarifas de CONELEC, Ecuador, Subsecretario de Energía Renovables y Eficiencia Energética, Ministerio de Electricidad, Ecuador, Coordinador de Áreas Corporativas de ECUACIER, Coordinador Internacional de Electricidad en OLADE, Profesor de Maestría en Sistemas de Potencia en varias Universidades de Ecuador.

Actualmente es jefe del Departamento de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Sus áreas de interés son: Planificación de Sistemas de Potencia, Tarifas Eléctricas, Sistemas de Potencia, Sistemas de Distribución, Eficiencia Energética, Energías renovables, Estabilidad de SEP, Confiabilidad de SEP, Protecciones Eléctricas, entre otras.