

**FLOWS AND STABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS  
WITH SIMULINK****ANÁLISIS DE FLUJOS Y ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA CON SIMULINK**

**MSc. Abel E. Quezada Carreón\***, **MSc. Jorge A. Pérez Venzor\***  
**MSc. Oscar Núñez Ortega\*\***, **MSc. David García Chaparro\***

**Universidad Autónoma de Ciudad Juárez**, Chihuahua, México

\* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación

Tel.: (+52) 656-68848 00 Ext. 4741, E-mail: abquezad@uacj.mx.

Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Chihuahua, México

\*\* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

**Abstract:** This paper presents an implementation of a simulation tool Matlab/Simulink, which allows power flow analysis and dynamic stability in electric power systems. It has been used Matlab/Simulink because the power flow studies and stability are not included in this software, this gives the analysis and design for use by students of engineering and expertise in the electrical area. The business software's that have this tool are expensive and are focused on electric power networks of multiple nodes, making them inaccessible for teaching purposes.

**Resumen:** En este trabajo se presenta la implementación de una herramienta de simulación en Matlab/Simulink, la cual permite hacer análisis de flujos de potencia y estabilidad dinámica en los sistemas eléctricos de potencia. Se ha utilizado Matlab/Simulink debido a que los estudios de flujos de potencia y estabilidad no están incluidos en dicho software, con esto se aporta el análisis y diseño para ser utilizado por estudiantes de ingeniería y maestría en el área de eléctrica. Los "softwares" comerciales que cuentan con esta herramienta son costosos y están enfocados hacia redes eléctricas de potencia de múltiples nodos, lo cual los hace inaccesibles para fines didácticos.

**Keywords:** Simulation, Matlab / Simulink, power flow, dynamic stability.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta la metodología para la elaboración de una herramienta de simulación en Matlab/Simulink. (Abel Quezada C. 2006).

En la actualidad los estudios de flujos de potencia y estabilidad son de gran importancia (J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma 2004), ya que estos permiten determinar la cantidad de energía que un sistema de potencia puede transferir sin que este se colapse ante perturbaciones o cambios de cargas.

Los programas de simulación que se utilizan en la industria para desarrollar estudios de estabilidad no están diseñados para propósitos de enseñanza. Anteriormente se había desarrollado la herramienta de simulación para estudios de estabilidad, pero era necesario hacer uso de un programa externo que resolviera flujos de potencia. Por esta razón fue necesario desarrollar un programa en Matlab que resolviera flujos de potencia y de esta forma hacer las simulaciones de estabilidad en un mismo software.

El Matlab/Simulink es una herramienta de programación muy popular entre los estudiantes. El desarrollo de una herramienta de simulación para estudios de flujos de potencia y estabilidad en este programa es de gran aportación didáctica. Las máscaras de Simulink permiten personalizar los bloques (agregar textos de ayuda, interfaz de usuario y personalizar el icono del bloque), haciendo que la programación con éstos sea más fácil (The MathWorks, Inc. 2002). Los modelos que se utilizan para representar a los componentes del sistema eléctrico de potencia deben de ser adecuados para estudios de control y estabilidad, ya que las ecuaciones de estos no deben de contar con los términos que representan a los transitorios electromagnéticos.

**2. ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA**

**2.1. Solución de flujos de potencia.**

El problema de flujos de potencia consiste en calcular la magnitud y el ángulo de fase en cada nodo del sistema de potencia en condiciones de estado estacionario. Como subproducto de este cálculo se pueden determinar los flujos de potencia real y reactiva en equipos como líneas de transmisión y transformadores, así como también pérdidas en los mismos (Glover y Sarma, 2004).

Para la solución de flujos de potencia se plantean las ecuaciones no lineales (1) y (2), las cuales se pueden resolver utilizando diferentes métodos numéricos (Kundur, 1993).

$$P_i = V_i^2 G_{ij} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \text{Sen}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (1)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ij} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \text{Sen}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \text{Cos}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (2)$$

$P_i$  y  $Q_i$  son las Potencias activas y reactivas inyectadas en las terminales de cada elemento del sistema.  $G$  y  $B$  son los elementos de la matriz de admitancias de la red y  $\theta$  es el ángulo de las admitancias de la red.

El método numérico empleado en este trabajo es el de Newton-Raphson (NR) debido a que la mayor parte de los sistemas convergen en un número no mayor a 10 iteraciones (Tinney y Hart, 1967). Para aplicar el método NR al problema de flujos de potencia, las ecuaciones (1) y (2) se deben expresar en la forma de la ecuación (3), y se resuelve para el conjunto de magnitudes y ángulos de voltajes nodales desconocidos (Kundur, 1993).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial P}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3)$$

**2.2. Implementación de la solución de flujos de potencia en MATLAB**

En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático con el cual fue programado el método de NR para la solución de flujos de potencia.

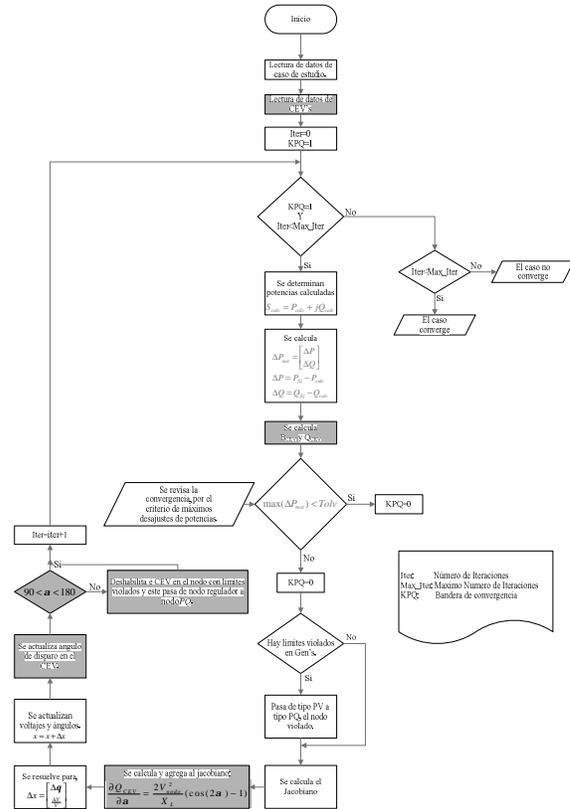


Fig. 1. Diagrama esquemático de flujos de potencia

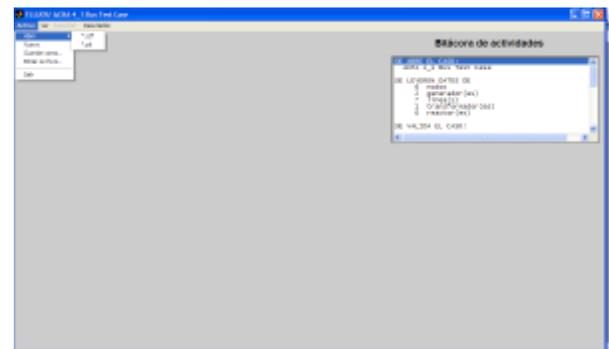


Fig. 2. Ventana principal del simulador flujos

En la figura 2 se muestra la interfaz que se construyó en MATLAB para la adquisición de datos. Los datos pueden ser ingresados en 3 formas: Directamente a través de la interfaz, mediante un archivo en formato '\*.cdf' (*Common Data Format*) [5] y mediante un archivo en formato '\*.ptl' (*Power Tech Laguna*).

Los resultados se pueden desplegar en 4 formas:

- Texto.- Despliega los resultados en forma de texto en 3 formas:  
*Nodales*.- Permite visualizar las magnitudes de los voltajes y ángulos nodales  
*Flujos de carga*.- Permite visualizar los flujos de potencias activa y reactiva entre nodos.  
*Generación*.- Permite visualizar potencias activa y reactiva de generación.
- Gráfico.- Despliega una gráfica de las magnitudes de los voltajes nodales.
- Imprimir archivo.- Genera la impresión de los resultados del caso de estudio en un archivo tipo 'm'. También genera la impresión de una salida gráfica de las magnitudes de voltajes nodales en formato '.jpg'.
- Archivo para estabilidad.- Graba un archivo tipo "m" en el formato adecuado para ser leído por la herramienta de simulación presentada en la parte 3 de este artículo.

### 3. ANALISIS DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

#### 3.1. Modelo básico del problema de estabilidad.

La estabilidad se define como la propiedad de un sistema de potencia para permanecer en un estado de operación equilibrado bajo condiciones normales y recuperar un estado estable de equilibrio después de estar sujeto a un disturbio (Kundur, 1993).

El modelo para estudios de estabilidad esta diseñado con la aproximación quasi-senoidal de los sistemas dinámicos de potencia (van Cutsem y Vournas, 1998):

$$dx/dt = f(x, v_x, v_y) \quad (4)$$

$$\tilde{I}(x, v_x, v_y) - Y \cdot \tilde{V} = 0 \quad (5)$$

- (1) Donde  $x$  es el correspondiente vector de estado de generadores síncronos, máquinas de inducción etc.
- (2) Es la ecuación de la red, en donde  $I$  es el fasor complejo de corrientes inyectadas a la

red de dimensión  $n$ .  $\tilde{V}$  es el fasor de voltajes en los nodos de dimensión  $n$ , y  $Y$  es la matriz de admitancias de la red de dimensión  $n \times n$ .

#### 3.2. Implementación de la Herramienta de Simulación en Simulink

Se diseñó una librería de bloques en Simulink, los cuales permiten resolver la ecuación (5). En donde el fasor de corriente ( $I$ ) es obtenido de los elementos conectados al sistema de potencia (generadores, equivalentes de Thevenin, motores de inducción y cargas estáticas). La matriz de admitancias  $Y$  es obtenida del programa que soluciona flujos de potencia (Parte 2). Finalmente queda una incógnita a resolver que es el fasor de voltaje ( $V$ ) en los nodos.

Todos los bloques de los elementos del sistema son diseñados de tal forma que tengan el voltaje  $V$  del nodo correspondiente como entrada y la corriente inyectada a la red como salida "I", tal como lo ilustra la figura 3. Para el caso del generador síncrono fue necesario agregar 2 señales más: el voltaje de campo ( $V_{fd}$ ) y la velocidad del rotor ( $w_r$ ), esto con el fin de incorporar al mismo controladores de excitación (AVR) y estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) (IEEE *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines* 2007).

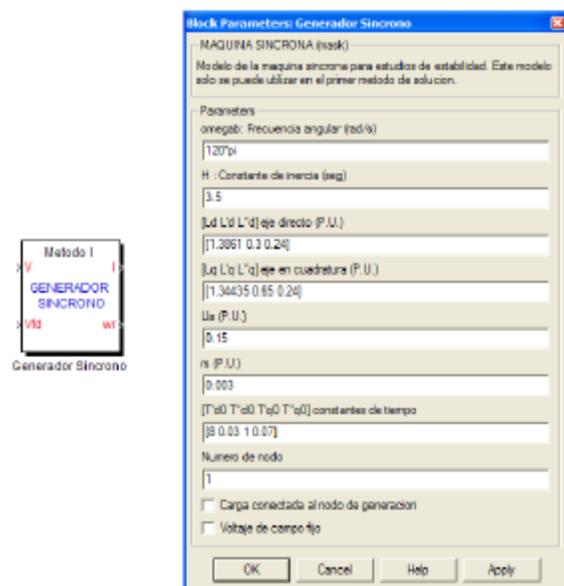


Fig. 3. Bloque del generador Síncrono

El bloque de red esta diseñado de tal forma que la entrada a este, sean los fasores de corrientes ( $I$ )

provenientes de los bloques que representan a los elementos del sistema de potencia, y la salida del mismo sean los fasores de voltaje ( $\tilde{V}$ ) en los nodos (figura 4). Los datos que se asignan en la interfaz se utilizan para especificar la falla.

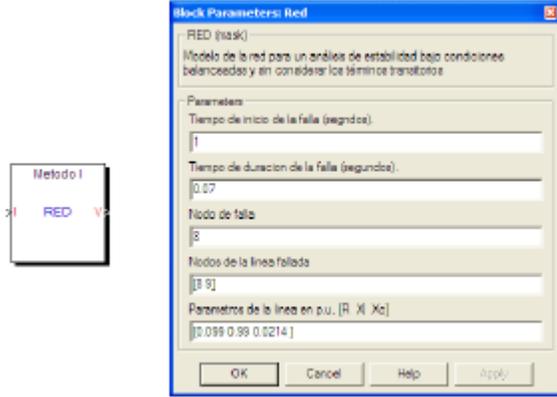


Fig. 4. Bloque de la red

### 3.3. Metodología implementada para realizar simulaciones

En el siguiente ejemplo se muestra algunos rasgos sobresalientes de esta herramienta de simulación. En este caso de estudio se analiza un sistema de potencia de 11 nodos, el cual es dividido en 2 áreas similares como se observa en la figura 5 (Kundur, 1993).

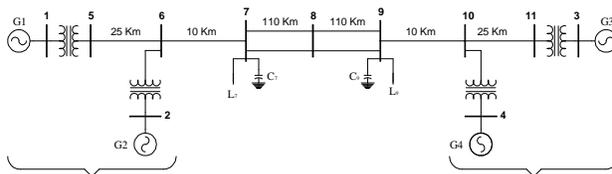


Figura 5. Sistema de Potencia de 5 nodos

Los parámetros de los generadores en por unidad considerando una base de 900 MVA y 20 KV son los siguientes:

$X_d=1.8$	$X_q=1.7$	$X_{ls}=0.2$	$X'_d=0.3$	$X'_q=0.55$
$X''_d=0.25$	$X''_q=0.25$	$r_s=0.0025$	$T'_{d0}=8.0$	$T''_{q0}=0.4$
$T''_{d0}=0.03$	$T''_{q0}=0.05$	$H=6.5$ (Para G1 y G2)	$H=6.175$ (Para G3 y G4)	

La impedancia de los transformadores es de  $0+j0.15$  con una base de 900 MVA y 20/230 KV. Las longitudes de las líneas están definidas en la figura 5.8, y los parámetros en por unidad con una base de 100 MVA, 230 KV son:

$r=0.0001$	$X_{ls}=0.001$	$b_c=0.00175$
pu/km	pu/km	pu/km

Las cargas fijas aplicadas en los nodos 7 y 9 son:

Nodo	$P_L = 967$	$Q_L = 100$	$Q_C = 200$
7:	MW	MVAR	MVAR
Nodo	$P_L = 1767$	$Q_L = 100$	$Q_C = 350$
9:	MW	MVAR	MVAR

La metodología utilizada para realizar la simulación de estabilidad se puede observar en la figura 6.

En este modelo se observa que cada elemento del sistema es representado mediante un bloque y todos se conectan al bloque de red, además el número de entradas al bloque de red corresponde al número de buses del sistema. Las etiquetas [V1] y [V1] indican que existe una conexión oculta.

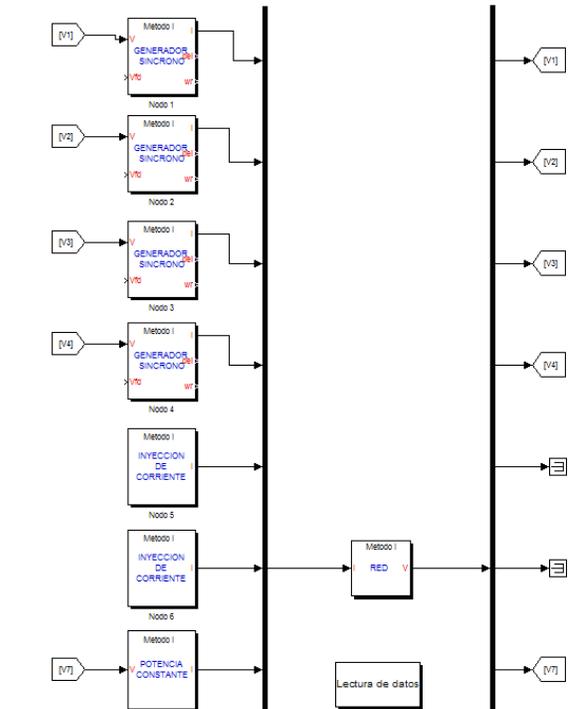


Fig. 6. Implementación del sistema de potencia en Simulink

En la figura 6, también se observa un bloque que dice “lectura de datos” dándole doble clic a este bloque se ejecuta un archivo m, el cual se encarga de realizar la lectura de la información proveniente del programa que resuelve flujos de potencia (Parte 2).

Con los datos provenientes de flujos de potencia es posible inicializar las variables dinámicas del sistema y partir de un estado estacionario.

#### 4. RESULTADOS

Para demostrar los resultados que se obtienen de esta herramienta de simulación consideramos el sistema de potencia de la figura 5 (Kundur, 1993). En este caso de estudio se analiza la respuesta del sistema de potencia con diferentes alternativas de excitación cuando se presenta una falla en el nodo 8, cuya duración es de 0.07 segundos y se aclara mediante la salida de una de las líneas conectadas en los nodos 8 y 9.

Se pretende analizar la estabilidad del sistema con las siguientes alternativas de controles de excitación (IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines, 2007).

- i. Control manual, manteniendo constante  $E_{fd}$ .
- ii. Sistema de excitación DC1A con PSS.
- iii. Sistema de excitación AC4A con PSS.

En las figuras 7 a 9 se muestra la respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) de los generadores 3 al 4 en relación con el generador 1.

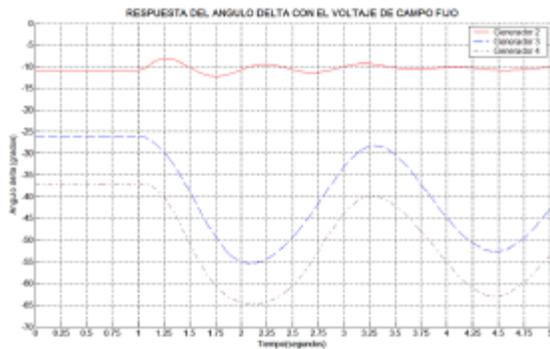


Fig. 7. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el voltaje de campo fijo

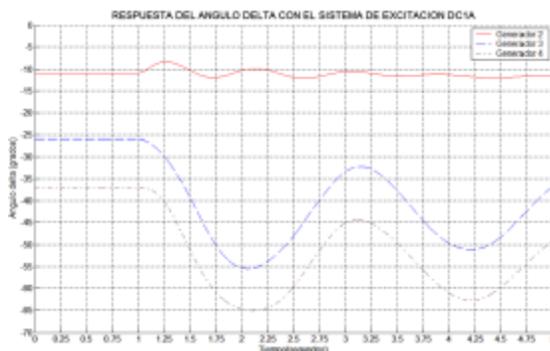


Fig. 8. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el sistema de excitación DC1A con PSS

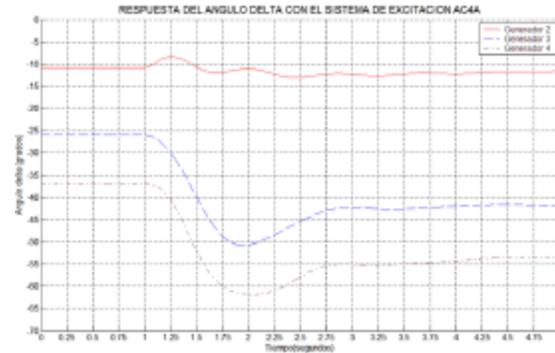


Fig. 9. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el sistema de excitación AC4A con PSS

En estas gráficas se observa que el sistema se mantiene en sincronismo con y sin sistemas de excitación, también se observa que el generador 2 tiene menor variación debido a que está más cerca del generador 1 y más alejado de la falla.

En las gráficas 8 y 9 se observa como los sistemas de excitación ayudan a amortiguar las oscilaciones, en donde el sistema de excitación AC4A estabiliza en un menor tiempo al sistema de potencia.

El simulador de flujos de potencia se comparó con el simulador *Power World Simulator* y se obtuvieron los mismos resultados. Para el caso del simulador de estabilidad se revivió un caso de estudio de 4 generadores conectados a un bus infinito (Kundur, 1993) y se compararon las gráficas y se obtuvieron los mismos resultados.

#### 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la metodología para la elaboración de una herramienta de simulación de estabilidad y flujos de potencia en Matlab/Simulink.

Se realizó un estudio de estabilidad para un sistema de potencia multi-máquinas y se observó la respuesta del sistema ante una falla, se probaron diferentes controles de excitación, dando como resultado un modelo estable. Con esta Herramienta de simulación se simplifica la forma de analizar problemas de estabilidad en sistemas de potencia utilizando un solo programa (Matlab/Simulink) a diferencia de (Quesada, 2006) donde se utilizaban dos programas para obtener el mismo resultado.

El desarrollo de una herramienta de simulación para estudios de control y estabilidad en Matlab/Simulink es de gran aportación didáctica.

**REFERENCIAS**

- MathWorks, Inc (2002). "Simulink Model-Based and System-Based Design".
- Kundur, P. (1993) "Power System Stability and Control" in EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill, Inc.
- Duncan Glover, J.; Sarma, Mulukutla S. (2004) "Sistemas de Potencia Análisis y Diseño" Thomson, Tercer edición.
- Tinney, W. F. y Hart, C. E. (1967), "Power Flow Solutions by Newton's Method", IEEE Trans. PAS 86, pág. 1449.
- IEEE Flow Data (1973), Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, pp. 1916-1925.
- van Cutsem, T. y Vournas C. D. (1998) "Voltage Stability of Electric Power System" Power Electronics and Power Systems Series. Kluwer Academic Publishers.
- IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines (2007), Standard Definitions for Excitation Systems" IEEE Std 421.1<sup>TM</sup>.
- Quezada C., Abel y Vargas S., Ricardo. (2006) "Herramienta de Simulación para Control y Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia basada en Simulink". Reunión de Verano de Potencia 2006