

# DISEÑO DE LOS PARÁMETROS DE UN ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS) BASADO EN UNA TÉCNICA EVOLUTIVA

## Design of the Parameters based in Evolutionary Technique of a Power System Stability

### RESUMEN

En este artículo se presenta un método de diseño basado en un algoritmo evolutivo para encontrar los parámetros de un estabilizador del sistema de potencia clásico PSS. Se utiliza una técnica evolutiva que realiza un ajuste a los parámetros del PSS. El análisis de los autovalores y los resultados de la simulación lineal y no lineal muestran la efectividad del método en el amortiguamiento de oscilaciones del sistema de potencia, ampliando los límites de estabilidad. El análisis fue realizado sobre una máquina síncrona conectada a un barraje infinito (SMIB, *single machine infinite bus power system*).

**PALABRAS CLAVES:** Estabilidad, PSS, Modelo lineal y no lineal, Técnica Evolutiva, SMIB.

### ABSTRACT

*This paper shows a method of design appears to find the parameters of a classic power system stabilizer. This method consists of an evolutionary technique that makes an optimal adjustment of the parameters of the PSS. The eigenvalue analysis and linear and nonlinear simulation results show the effectiveness of the technique in the damping of oscillations extending the stability limits. The analysis was made on a single machine infinite bus model (SMIB).*

**KEYWORDS:** Stability, PSS, Linear and no linear Models, Evolutionary Technique, SMIB.

### 1. INTRODUCCIÓN

El problema de inestabilidad de los sistemas eléctricos ha sido un asunto de mucha investigación durante décadas. Una de las soluciones rentables al problema, esta en adicionar un estabilizador de sistemas de potencia (PSS), el cual inyecta una señal a través del sistema de control de excitación del generador, con el objetivo de amortiguar los efectos de las oscilaciones. Este dispositivo permite extender la transferencia de potencia y los límites de estabilidad del sistema, produciendo una componente del torque eléctrico en fase con la velocidad, que se encarga de amortiguar las oscilaciones del ángulo de par. El PSS suministra un amortiguamiento para las excursiones de pequeña señal alrededor de un punto de operación, permitiendo la recuperación del sistema, luego que se presente una pequeña perturbación [1-4], [6], [7].

Los criterios de diseño y ajuste dependen de la señal o señales que se apliquen a su entrada, sin embargo, cualquiera que sea la o las escogidas, la función de transferencia del estabilizador debe compensar el retraso de fase del generador, sistema de excitación y sistema de potencia. La función de transferencia del sistema depende fuertemente del punto de operación del generador, de la

### ALFONSO ALZATE G.

Ingeniero Electricista, M.Sc.  
Profesor Titular  
Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
alazate@utp.edu.co

### CARLOS ANDRÉS TORRES P.

Ingeniero Electricista.  
Profesor Catedrático  
Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ctorres@ohm.utp.edu.co

### CARLOS A. RESTREPO P.

Ingeniero Electricista, M.Sc.  
Profesor Catedrático  
Tecnología Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
cr@utp.edu.co

### GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA

ganancia del regulador y del sistema de potencia, por lo que el PSS debe ajustarse en un punto que represente una condición de operación crítica, de tal manera que trabaje en la forma adecuada en un buen margen de variación de las condiciones de operación [6], [7].

Existen diferentes estructuras del estabilizador de sistema de potencia (PSS), utilizadas extensamente en los sistemas eléctricos, una de ellas es el PSS clásico conformado por una red de adelanto atraso, que compensa el retraso producido por el sistema. Los parámetros del sistema deben ser ajustados de tal manera que puedan proporcionar el funcionamiento deseado [2], [3], [4].

Debido al rápido desarrollo de las técnicas inteligentes en esta década, muchos investigadores en el campo de la ingeniería eléctrica han puesto la atención al uso de estas técnicas para solucionar los problemas en los sistemas de potencia [3].

El algoritmo evolutivo es una de las técnicas en el campo de la inteligencia artificial, la cual es una combinación de varias técnicas: algoritmos genéticos, programación evolutiva, estrategias evolutivas, y programación

genética [5]. En este artículo se propone una estrategia de diseño del PSS clásico, mediante el algoritmo evolutivo, el cual dará un ajuste adecuado de los parámetros del estabilizador. Esta técnica es probada en un sistema de potencia configurado por un generador sincrónico conectado a un barraje infinito a través de una línea de transmisión.

**2. MODELO DEL SISTEMA**

El sistema considerado en este artículo es un sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión, tal y como se muestra en la Figura 1.

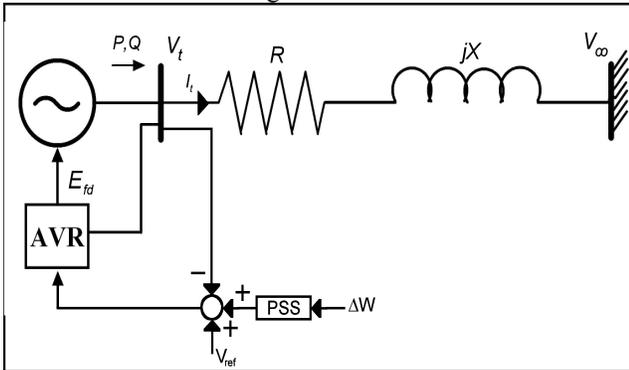


Figura 1. Máquina Síncrona en un Sistema de Potencia de Barraje Infinito.

La ecuación de voltaje del sistema mostrado en la Figura 1, puede ser escrita como:

$$V_t = jX \cdot I_t + V_\infty \tag{1}$$

En donde las ecuaciones de (2) a (7) se detallan con claridad en [6] y [7].

$$I_t = I_{td} + jI_{tq} = |I_t| \angle \varphi \tag{2}$$

$$I_{tq} = \frac{V_\infty \cdot \text{sen}(\delta)}{X_q + X} \tag{3}$$

$$I_{td} = \frac{E'_q - V_\infty \cdot \text{cos}(\delta)}{X'_d + X} \tag{4}$$

$$V_t = V_{td} + jV_{tq} \tag{5}$$

Donde:

$$V_{td} = X_q \cdot I_{tq} \tag{6}$$

$$V_{tq} = E'_q - X'_d I_{td} \tag{7}$$

El modelo no lineal de la máquina síncrona en el SMIB (Figura 1) se describe con las siguientes:

$$\dot{\delta} = W - W_s \tag{8}$$

$$\dot{W} = \frac{W_s}{M} \cdot \left[ T_M - (E'_q \cdot I_{tq} + (X_q - X'_d) I_{td} \cdot I_{tq}) + -D \cdot (W - W_s) \right] \tag{9}$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \left[ E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d) \cdot I_{td} \right] \tag{10}$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} \cdot \left[ E_{fd} - K_A \cdot (V_{ref} - V_t) \right] \tag{11}$$

Suponiendo variaciones pequeñas alrededor de un punto de operación, se obtiene el modelo linealizado de la máquina síncrona tal como sigue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{V} \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -k_4 & 0 & \frac{1}{T'_{d0}} \\ k_3 T'_{d0} & T'_{d0} & 0 & T'_{d0} \\ 0 & 0 & W_s & 0 \\ -k_2 & -k_1 & -\frac{DW_s}{2H} & 0 \\ \frac{-k_A k_6}{T_A} & \frac{-k_A k_5}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \Delta V_{ref} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_M \tag{12}$$

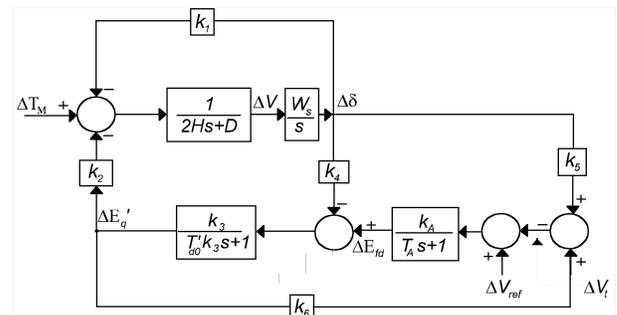


Figura 2. Modelo de Heffron-Phillips de un sistema SMIB sin PSS.

**3. DISEÑO DEL PSS**

Las señales derivadas de la velocidad de la máquina, frecuencia terminal, ó potencia se procesan a través del PSS, representado con una función de transferencia \$G(s)\$ y su salida conectada a la entrada de la excitación. La

Figura 3 muestra el PSS con la señal de velocidad como entrada.

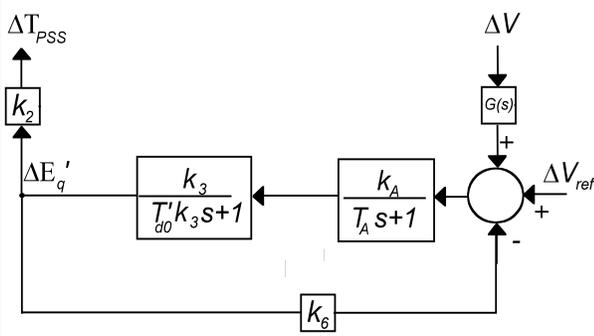


Figura 3. Velocidad como señal de entrada al PSS.

En este artículo el estabilizador de potencia utilizado es un PSS clásico de orden 1, el cual se compone de una red de adelanto atraso tal como se observa en la ecuación (13).

$$G(s) = K_{PSS} \frac{(1 + T_1 s)}{(1 + T_2 s)} \quad (13)$$

Las constantes  $T_1$  y  $T_2$  se deben fijar para proporcionar amortiguamiento sobre la gama de frecuencias en las cuales son probables de ocurrir las oscilaciones [6].

La ecuación agregada a la matriz de estado debido al PSS es:

$$\Delta \dot{y} = \frac{-1}{T_2} \Delta y + \frac{K_{PSS}}{T_2} \Delta V + K_{PSS} \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{-K_2}{2H} \Delta E_q' + \frac{-K_1}{2H} \Delta \delta \right) \quad (14)$$

La nueva matriz de estado es:

$$\begin{bmatrix} \frac{-1}{k_3 T'_{d0}} & \frac{-k_3}{T'_{d0}} & 0 & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 \\ 0 & 0 & W_s & 0 & 0 \\ \frac{-k_2}{2H} & \frac{-k_1}{2H} & \frac{-DW_s}{2H} & 0 & 0 \\ \frac{-k_A k_6}{T_A} & \frac{-k_A k_5}{T_A} & 0 & \frac{-1}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} \\ \frac{-k_2 T_1}{T_2} \left( \frac{K_{PSS}}{2H} \right) & \frac{-k_1 T_1}{T_2} \left( \frac{K_{PSS}}{2H} \right) & \left( \frac{K_{PSS}}{T_2} \right) & 0 & \frac{-1}{T_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

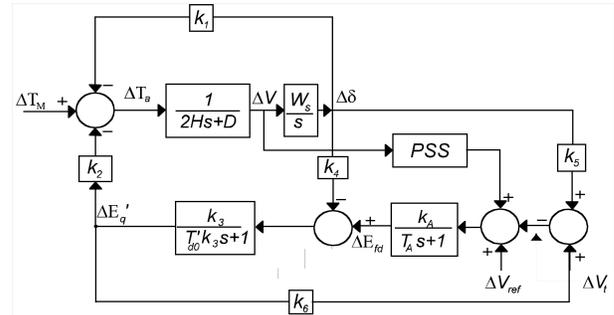


Figura 4. Modelo de Heffron-Phillips de un sistema SMIB con PSS.

### 3.1 Diseño del PSS usando Algoritmo Evolutivo

#### 3.1.1 Algoritmo Evolutivo

Los algoritmos evolutivos constituyen una herramienta matemática que se utiliza para resolver problemas asociados con la búsqueda de soluciones óptimas. Se basan en la teoría de la evolución de los seres vivos en la naturaleza [8]. La mecánica en este tipo de algoritmos se fundamenta en el hecho de partir de un conjunto posible de soluciones, donde a cada una de ellas se les conoce como individuos y al grupo en general como población [8,9]. A esta población se le aplica un conjunto de operadores llamados operadores genéticos, de los cuales se consideran básicos los siguientes: la selección, la mutación y el cruce. Junto a estos el otro elemento fundamental es la función de evaluación, la cual va a medir cual de los individuos involucrados en el proceso es más apto y por tanto se acerca más a la solución óptima [8,10]. La principal característica de los algoritmos genéticos, es la robustez, particularidad que otros métodos de optimización tradicionales como los métodos matemáticos basados en el cálculo o los heurísticos no tienen.

El conjunto de soluciones denominado población, tiene individuos de la forma:

$$C_i = [K^i_{PSS} \quad T_1^i \quad T_2^i]$$

La población inicial se genera de manera aleatoria y esta compuesta de  $N$  individuos, donde cada uno de ellos es evaluado en la función objetivo dada por (21), para determinar su optimalidad.

El operador de recombinación consiste en escoger dos configuraciones en forma aleatoria,  $C_X$  y  $C_Y$ , entre la población y generar a partir de ellas dos nuevas configuraciones [9,11]. Los dos nuevos individuos se obtienen de la siguiente forma:

$$C_{i_X} = 0.5((1 + \beta)C_X + (1 - \beta)C_Y)$$

$$C_{i_Y} = 0.5((1 - \beta)C_X + (1 + \beta)C_Y)$$

donde el factor de cobertura  $\beta$  se define como:

$$\beta = \begin{cases} 2\mu^{\frac{1}{\eta+1}} & , \mu \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-\mu)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}} & , \mu > 0.5 \end{cases}$$

Aquí,  $\eta$  es un valor real positivo. Se recomienda que esté en el rango (2,5) y  $\mu$  es un número generado de forma aleatoria. La recombinación es  $N + \lambda$ , es decir, se generan  $\lambda$  nuevos individuos y con cada uno de ellos se evalúa la función objetivo.

La selección se encarga de mantener la población constante y esto se reduce a seleccionar de los individuos de la recombinación,  $N$  que tenga la mejor función objetivo.

La mutación permite dar más diversidad a los individuos generados ya que incorpora nuevas características que no presentaban los individuos que lo generaron. La tasa de mutación empleada fue del 5% [10,12]. La mutación sólo modifica una de las componentes del individuo entre los rangos establecidos con una varianza de 0.1 y media igual al valor que se quiere modificar.

#### 4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La selección de los parámetros del PSS determina el comportamiento de la velocidad en la máquina síncrona ante un arranque y un cambio en la carga del eje. Lo que se busca es un tiempo de respuesta rápido ante cualquier variación en el sistema de potencia con una amortiguación baja. Por lo anterior el modelo toma la forma:

$$\min \left\{ \int_0^{\infty} (\Delta V t)^2 dt \right\} \quad (21)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} K_{PSS_{\min}} &\leq K_{PSS} \leq K_{PSS_{\max}} \\ T_{1_{\min}} &\leq T_1 \leq T_{1_{\max}} \\ T_{2_{\min}} &\leq T_2 \leq T_{2_{\max}} \end{aligned}$$

y la matriz de estado dada en la ecuación (15).

#### 5. RESULTADOS

Con los parámetros del sistema establecidos en el anexo y los parámetros del PSS calculados con el algoritmo evolutivo se muestran los valores propios de cada matriz de estado.

La matriz de estado del sistema sin PSS:

$$\begin{bmatrix} -0.3511 & -0.1956 & 0 & 0.1042 \\ 0 & 0 & 377 & 0 \\ -0.1443 & -0.1347 & 0 & 0 \\ -840.4385 & -41.0606 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{1,2} = -2.513 \pm 9.2838i, \quad \lambda_{3,4} = -0.16422 \pm 6.7768i,$$

La matriz de estado del sistema con PSS calculado con el algoritmo evolutivo:

$$\begin{bmatrix} -0.3511 & -0.1956 & 0 & 0.1042 & 0 \\ 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.1443 & -0.1347 & 0 & 0 & 0 \\ -840.4385 & -41.0606 & 0 & -5 & 2000 \\ -39.563 & -36.95 & 178.19 & 0 & -54.348 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{1,2} = -0.72854 \pm 16.085i \quad \lambda_{3,4} = -0.62429 + 3.9043i,$$

$$\lambda_5 = -56.993$$

Se puede observar la mejora en el amortiguamiento en el modo  $\lambda_{3,4}$ .

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo lineal y no lineal del sistema propuesto comprobando la veracidad de los valores propios obtenidos por las matrices de estado. Inicialmente se tiene que a los 30 segundos se aplica una perturbación en la referencia de tensión al incrementarla de 1 a 1.05 en ambos modelos, tal y como se muestra en las figuras 5 y 6.

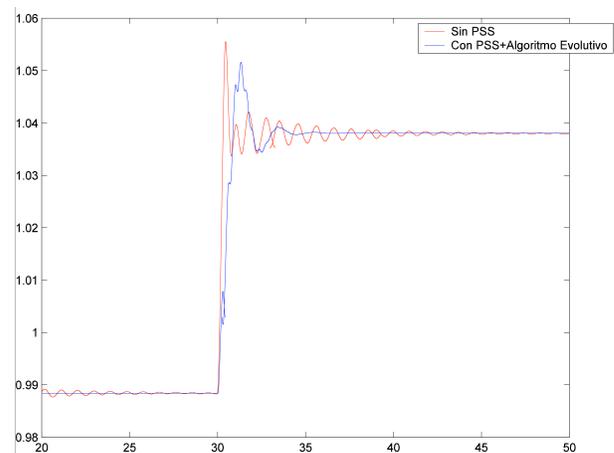


Figura 5. Respuesta de la tensión con y sin PSS, modelo lineal

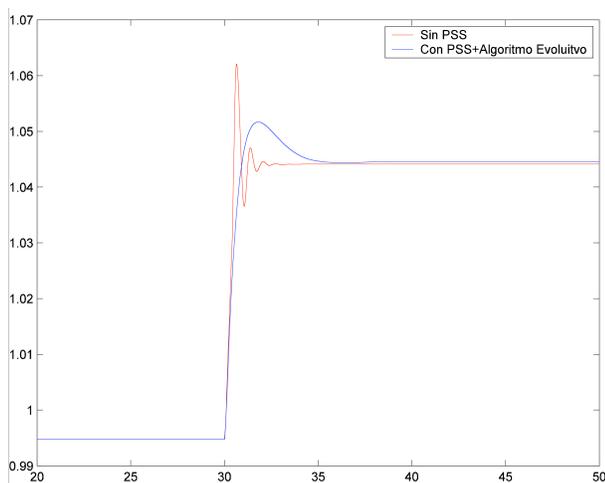


Figura 6. Respuesta de la tensión con y sin PSS, modelo no lineal

Posteriormente se aplica la variación en la referencia a los 20 segundos y a los 30 segundos se introduce una variación fuerte de carga del 200%.

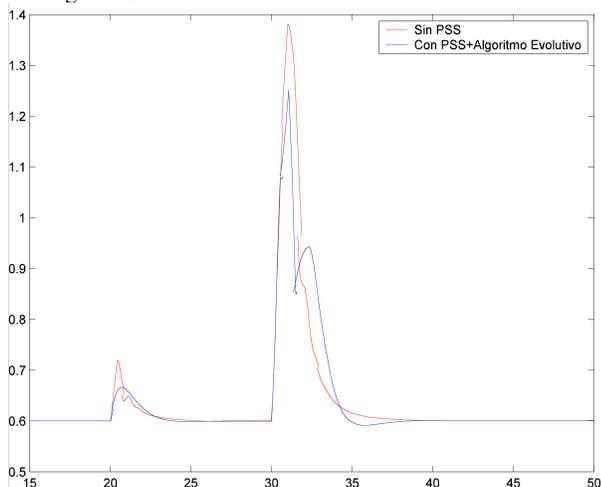


Figura 7. Respuesta de la potencia eléctrica, modelo no lineal

Se puede observar de nuevo los efectos benéficos del uso del PSS con algoritmo evolutivo, en presencia de perturbaciones, sobre la potencia eléctrica.

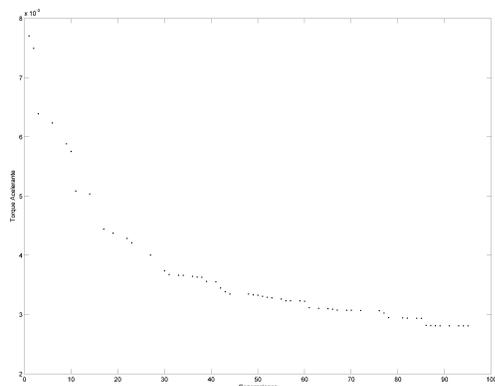


Figura 8. Evolución del ISTSE a través de las generaciones.

En la Figura 8 se muestra la convergencia del algoritmo evolutivo mediante la metodología de error ISTSE (Integral Squared Time Square Error) dado en (21).

## 6. CONCLUSIONES

El algoritmo evolutivo encontró unos parámetros del estabilizador del sistema de potencia clásico, los cuales permitieron que el sistema diera una buena respuesta ante variaciones en la referencia y ante perturbaciones del 200% en la carga.

Las oscilaciones son más pequeñas lo cual implica un mejoramiento en la dinámica del sistema y la ampliación de los límites de estabilidad.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Dubey, P. Gupta, "Design of Genetic-Algorithm Based Robust Power System Stabilizer," *International Journal of Computational Intelligence*, ISSN 1304-2386, vol. 2, N°1, Page(s):48-52, 2005.
- [2] K. Hongesombut, Y. Mitani and K. Tsuji, "Power System Stabilizer Tuning in Multimachine Power System Based on Minimum Phase Control Loop Method and Genetic Algorithm," *14th PSCC, Sevilla, Paper 1, 24-28 June 2002*.
- [3] D. Menniti, A. Burgio, A. Pinnarelli, V. Principe, N. Scordino and N. Sorrentino, "Damping Oscillations Improvement by Fuzzy Power System Stabilizers Tuned by Genetic Algorithms," *14th PSCC, Sevilla, Paper 2, 24-28 June 2002*.
- [4] P. Shrikant Rao and Indraneel Sen, "Robust Tuning of Power System Stabilizers Using QFT," *IEEE/Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 7, N°. 4, pp. 478-486, July 1999.
- [5] D. Ashlock, *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization, vol. I. Guelph, Ontario: Springer, p. 33, 2005*.
- [6] P. W. Sauer, *Power System Dynamics and Stability, vol. I. New Jersey: Prentice Hall, p. 221, 1998*.
- [7] A. Alzate, *Dinámica de sistemas eléctricos, Estabilidad y control Maestría en Ingeniería eléctrica, UTP, 2000*.
- [8] Goldberg David. *Genetic Algorithms, in search optimization and machina learning, Primera edición, 412 páginas, Addison Wesley, ISBN 0201157675, 1989*.
- [9] Glover F. - Kochenberger G. A. *Handbook of metaheuristic. Kluwer Academic Publishers. Norwell. M.A. 2003*.

- [10] Ashlock Daniel. Evolutionary computation for modeling and optimization, *Springer, Primera Edicion, 2006, United States of America. ISBN 0-387-22196-4*
- [11] Menon Anil Daniel. Frontiers of evolutionary computation, *Kluwer Academic Publisher, Primera Edicion, 2004, United States of America. ISBN 1-4020-7782-3.*
- [12] Spall James C. Introduction to stochastic search and optimization, estimation, simulation and control, *Wiley-Intersciencie, Primera Edicion, 2003, United States of America.*

## 8. ANEXO

Se utilizaron los siguientes datos:

Punto de operación:  $P+jQ=0.6+j0.2$   $V_t = 1\angle 15^\circ$

### Máquina Síncrona:

$$R_s = 0 \quad X_d = 2.5 \quad X_q = 2.1 \quad X'_d = 0.39$$

$$T'_{d0} = 9.6 \quad H = 3.2 \quad D = 1 \quad W_0 = 377$$

$$k_1 = 0.8623 \quad k_2 = 0.9233 \quad k_3 = 0.2967$$

$$k_4 = 1.8773 \quad k_5 = 0.0205 \quad k_6 = 0.4202$$

### AVR:

$$K_A = 400 \quad T_A = 0.2$$

### Línea de Transmisión:

$$R=0 \quad X=0.5$$

### PSS:

$$K_{PSS} = 3.2787 \quad T_1 = 1.5390 \quad T_2 = 0.0184$$