

## ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL DE UN SISTEMA MÁQUINA - BARRA INFINITA

Játiva Jesús, Ph.D.      Aguilar Rommel  
Departamento de Energía Eléctrica  
Escuela Politécnica Nacional

### Resumen

Los Sistemas Eléctricos de Potencia están continuamente sujetos a perturbaciones de pequeña magnitud tales como cambios de carga y generación, cambios de taps de transformadores, entre otros; provocando desbalances que causan oscilaciones de diferente magnitud en el ángulo del rotor de las máquinas sincrónicas. Tales oscilaciones deben ser amortiguadas por los elementos de control del sistema, con el fin de evitar pérdida de sincronismo de las máquinas, la cual eventualmente puede conducir a inestabilidad transitoria.

Se desarrolla un programa en MATLAB para evaluar la estabilidad de pequeña señal de una máquina conectada a una barra infinita. Se realiza un caso de estudio para un generador de la fase C de la central hidroeléctrica Paute.

### Abstract

Power systems are continuously subjected to small disturbances such as transformer taps changers, load and generation changes, etc. These disturbances produce imbalances that cause different size rotor angle oscillations. In order to avoid loss of synchronism in the electrical machines, that eventually can lead to transient stability, such oscillations have to be damped out by the control system equipment.

A program is developed in MATLAB language, that is useful to evaluate the small signal stability of a single machine - infinite bus system. A study case is performed for a generator of the hydroelectric power plant Paute.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las perturbaciones inherentes en los sistemas de potencia provocan desequilibrios entre el torque mecánico y el torque electromagnético de cada máquina sincrónica del sistema.

[jjativa@yahoo.com](mailto:jjativa@yahoo.com)  
[aguilar\\_r14@yahoo.es](mailto:aguilar_r14@yahoo.es)

Tal desequilibrio se manifiesta en forma de crecientes oscilaciones angulares de algunos generadores que puede llevar a pérdida de sincronismo con otros generadores. Este problema corresponde a la estabilidad del ángulo del rotor, la cual se clasifica según la magnitud de la perturbación en: *estabilidad de pequeña señal* (para perturbaciones pequeñas) y *estabilidad transitoria* (para perturbaciones grandes) [1].

La estabilidad de pequeña señal o estabilidad de ángulo del rotor de pequeñas perturbaciones se refiere a la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo bajo perturbaciones pequeñas [2].

El cambio en el torque electromagnético de una máquina sincrónica luego de una perturbación está compuesto por dos partes: (1) componente sincronizante del torque, en fase con la desviación del ángulo de rotor y (2) componente de amortiguamiento del torque, en fase con la desviación de la velocidad.

La inestabilidad que puede resultar se manifiesta de dos formas:

- (a) oscilaciones crecientes del ángulo del rotor debido a la falta de *torque de amortiguamiento*, o
- (b) aumento del ángulo de rotor en forma no oscilatoria o no periódica debido a la falta de *torque sincronizante*.

Actualmente el problema de estabilidad de pequeña señal está únicamente asociado con amortiguamiento insuficiente de las oscilaciones. La inestabilidad no periódica ha sido eliminada, principalmente, con el uso de reguladores de voltaje de acción continua en los generadores; sin embargo, este problema puede ocurrir cuando los generadores operan con excitación constante debido a la acción de limitadores de corriente de campo [1].

En sistemas eléctricos de potencia grandes, los problemas de estabilidad de pequeña señal pueden ser de dos tipos:

- (a) *Problemas locales*, que involucran una pequeña parte del sistema y están

asociados con oscilaciones del ángulo de una sola central de generación (oscilaciones de planta locales). Son los más comunes y presentan oscilaciones de frecuencia en el orden de 0,7 a 2,0 Hz [2].

- (b) *Problemas globales*, son causados por interacciones entre grupos grandes de generadores (oscilaciones entre áreas). Son de características muy complejas y están influenciados considerablemente por las características de la carga. Se pueden presentar oscilaciones de baja frecuencia que están en orden de 0,1 a 0,3 Hz u oscilaciones de mayor frecuencia que están entre 0,4 y 0,7 Hz [2].

Se considera que las perturbaciones son suficientemente pequeñas de forma que las características no lineales del sistema pueden ser ignoradas, con un mínimo error en los resultados. La estabilidad de pequeña señal depende del punto inicial de operación y el análisis se desarrolla en su alrededor.

Los estudios de estabilidad de pequeña señal son necesarios, para una adecuada calibración de los parámetros de los elementos de control del sistema, especialmente de los generadores; de forma que el sistema pueda mantener o recuperar un estado de equilibrio luego de estar sujeto a una perturbación de pequeña magnitud.

En el presente trabajo se realiza un estudio de estabilidad de pequeña señal en el dominio del tiempo de un sistema máquina simple barra infinita, aplicado a una unidad de la fase C de la Central Hidroeléctrica Paute.

Se desarrolla un programa en Matlab, que permite calcular las constantes del modelo propuesto por Heffron y Philips en 1952, el cual considera al generador, el circuito de campo y el sistema de excitación (AVR), así como también el efecto de saturación del flujo en el entrehierro y el estabilizador de sistemas de potencia (PSS).

## 2. CONSIDERACIONES PARA LA LINELIZACIÓN DEL MODELO

El grado de no linealidad del sistema determina si la perturbación es o no suficientemente pequeña, lo cual cambia de acuerdo al punto de operación. De ahí que no hay una respuesta definitiva para saber si la perturbación es lo suficientemente pequeña de forma que la linelización sea aceptable. Esto requiere de habilidad y experiencia en el sistema en estudio. De todas formas, ciertos comportamientos del sistema se

reconocen dentro de la categoría de estabilidad de pequeña señal, como por ejemplo:

- resonancia subsincrónica [4],
- modos de control de estabilidad,
- oscilaciones locales o entre áreas.

Se pueden apreciar las condiciones en las cuales el análisis lineal es válido, considerando la relación no lineal entre el torque electromecánico (potencia) y el ángulo de carga de una máquina (Figura 1).

Para los dos puntos de operación que se muestran en la figura, el sistema se puede representar mediante un modelo lineal pero con características diferentes. Para cada caso, el sistema puede ser representado mediante un modelo lineal a lo largo de la tangente a la curva  $T_e - \delta$ , por lo tanto, el rango de variación del torque electromecánico y del ángulo de carga para los cuales la aproximación lineal es aceptable dependen del punto inicial de operación.

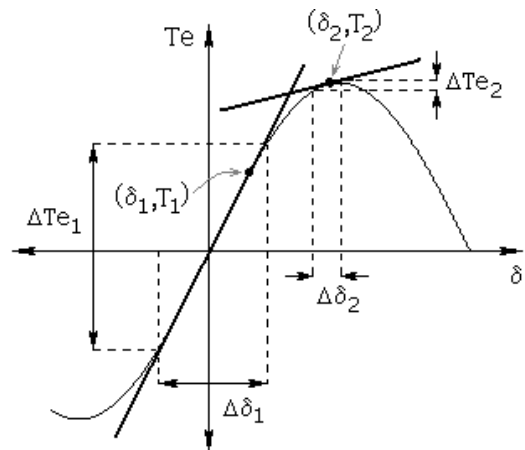


Figura 1. Relación entre el torque electromecánico y el ángulo de carga

La relación no lineal entre el torque y el ángulo de carga se define matemáticamente con la siguiente expresión:

$$T_e = P = P_{\max} \text{sen}(\delta) \quad (1)$$

Se puede obtener el modelo lineal del sistema evaluando la pendiente de la tangente de la función no lineal correspondiente a cada punto de operación.

La aproximación lineal para cualquier ángulo  $\delta$  es:

$$\frac{dP}{d\delta} = P_{\max} \cos(\delta) \quad (2)$$

Considerando la aproximación  $\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \approx \frac{dP}{d\delta}$ , se tiene:

$$\Delta P \approx \left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta_0} \Delta \delta \quad (3)$$

$\Delta P = P - P_0$  es la desviación de la potencia eléctrica,

$\Delta \delta = \delta - \delta_0$  es la desviación del ángulo de carga, y,

$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta_0}$ , es la tangente al modelo no lineal en  $\delta_0$ .

Para obtener el modelo lineal en un punto específico, se debe evaluar la aproximación lineal (pendiente) en dicho punto, por ejemplo, para un punto  $p$  ( $\delta = \delta_p$ ) dado, la aproximación lineal es:

$$\Delta P = [P_{\max} \cos(\delta_p)] \Delta \delta$$

Los coeficientes del modelo lineal, los cuales se obtienen al evaluar la tangente en un punto de operación, dan información del comportamiento del sistema ante perturbaciones pequeñas alrededor de dicho punto.

### 3. MODELO DEL GENERADOR

Se toma como referencia un sistema formado por un generador conectado a sistema eléctrico de potencia mediante un transformador y una línea de transmisión,

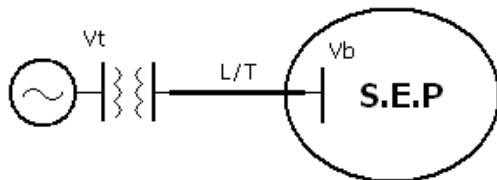


Figura 2. Máquina simple conectada a un sistema de potencia

Con la finalidad de facilitar el análisis, el sistema puede ser reducido usando el equivalente Thévenin de la red de transmisión vista desde los

bornes de generación (Figura 3), además se considera que la red es puramente inductiva.

Las ecuaciones no lineales que definen el comportamiento del sistema son las siguientes:

$$T_e = P = \frac{E V_b}{X_T} \text{sen}(\delta) \quad (4)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_m - T_e - K_D \omega_r \quad (5)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 \quad (6)$$

Donde  $\delta$  es el ángulo entre el voltaje interno del generador  $E$  y el voltaje de la barra infinita  $V_b$  y  $X_T$  es la reactancia entre los 2 voltajes ( $X_T = X_{d'} + X_e$ ).

Además se ha despreciado la resistencia de armadura, con lo cual se puede decir que el torque en el entrehierro es igual a la potencia eléctrica de salida.

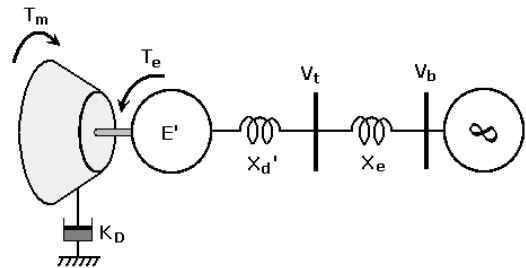


Figura 3. Modelo clásico de un generador, incluyendo el sistema mecánico

La constante  $K_D$ , incluida en la ecuación 5 (ecuación de oscilación), representa el torque de amortiguamiento, en fase con la variación de velocidad.

Linealizando las ecuaciones 4, 5 y 6 se tiene:

$$\Delta T_e = \left[ \frac{E V_b}{X_T} \cos(\delta_0) \right] (\Delta \delta) \quad (7)$$

$$p \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - K_D \Delta \omega_r) \quad (8)$$

$$p \Delta \delta = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (9)$$

Donde  $p$  es el operador diferencial  $d/dt$ , con el tiempo  $t$  en segundos.

De la ecuación 7 se obtiene el **coeficiente de torque sincronizante**  $K_S$ .

$$K_S = \left[ \frac{E V_b}{X_T} \cos(\delta_0) \right] \quad (10)$$

Reemplazando 9 en 7 y luego en 8, y linealizando la ecuación 6, se obtiene las ecuaciones lineales que describen el movimiento del sistema ante perturbaciones pequeñas alrededor de un punto de operación dado

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_S\Delta\delta - K_D\Delta\omega_r) \quad (11)$$

representando las ecuaciones 9 y 11 en forma matricial,

$$p \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_D & -K_S \\ 2H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (12)$$

Donde

$K_S$  = Coeficiente de torque sincronizante [pu torque / rad]

$K_D$  = Coeficiente de amortiguamiento del torque [pu torque / pu velocidad]

$H$  = Constante de Inercia [MW\*s/MVA]

$\Delta\omega_r$  = Desviación de la velocidad [pu]

$\Delta\delta$  = Desviación del ángulo [rad eléct.]

$\omega_0$  = Velocidad base [rad eléct. / s]

El comportamiento del sistema en pequeña señal puede ser descrito mediante el diagrama de bloques de la Figura 4.

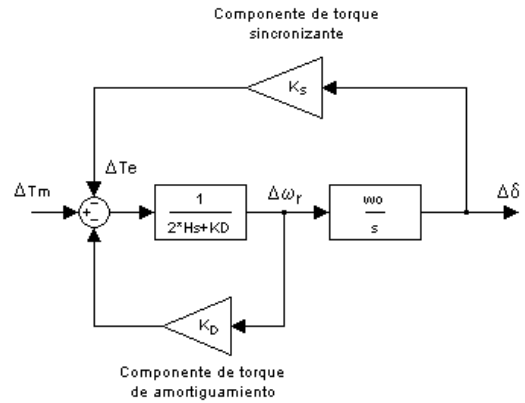


Figura 4. Diagrama de bloques que representa el modelo clásico de un generador

En el diagrama se muestra que cuando el sistema es perturbado debido a un cambio en el torque mecánico ( $\Delta T_m \neq 0$ ), aparecen dos tipos de torques que se oponen a dicho cambio.

El *torque sincronizante* está relacionado con la conversión de energía mecánica a eléctrica, es decir, que el generador es capaz de mantener sincronismo a través de convertir la potencia mecánica adicional de entrada en potencia eléctrica. La habilidad de desarrollar torque sincronizante es sumamente importante en estabilidad.

El torque de amortiguamiento está asociado con la disipación de energía, y es fundamental en la amortiguación de las oscilaciones del rotor. La constante  $K_D$ , la cual define la magnitud del torque de amortiguamiento, se debe a factores mecánicos y eléctricos. Entre los factores mecánicos están los rodamientos, la fricción del aire y la carga mecánica; y los factores eléctricos comprenden el efecto de los devanados de amortiguamiento, las cargas lineales y no lineales, y el funcionamiento de máquinas asíncronas (deslizamiento).

Del diagrama de bloques de la Figura 4, se puede obtener la frecuencia natural de oscilación  $\omega_n$  y la relación de amortiguamiento  $\zeta$  que resultan de una pequeña perturbación alrededor de un punto de operación

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} \quad (13)$$

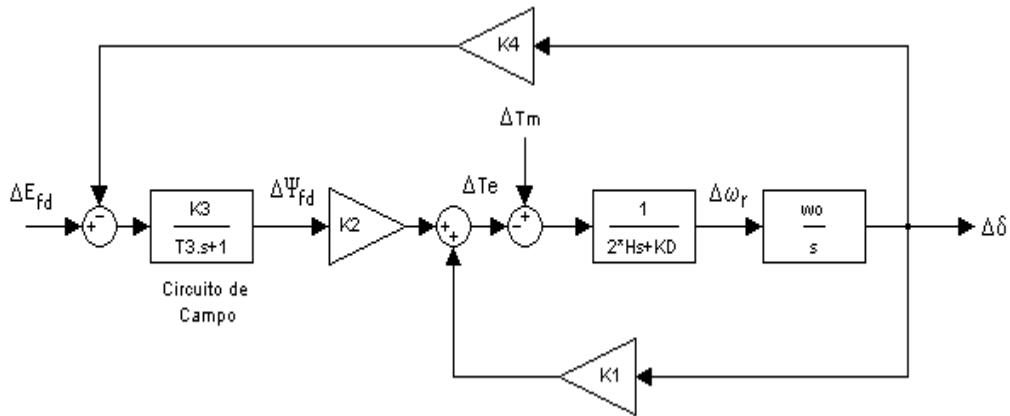


Figura 5. Modelación del circuito de campo

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2H K_S \omega_0}} \quad (14)$$

La frecuencia natural se usa para predecir los resultados cuando el sistema llega a ser inestable por insuficiente torque sincronizante y la relación de amortiguamiento es útil para determinar las posibles señales del sistema si este llega a ser inestable debido a insuficiente torque de amortiguamiento.

#### 4. MODELO DEL CIRCUITO DE CAMPO

La dinámica del circuito de campo está definida por la siguiente expresión [2]:

$$p\psi_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \quad (15)$$

Donde  $\psi_{fd}$ ,  $E_{fd}$ ,  $i_{fd}$  y  $R_{fd}$  son el flujo, voltaje, corriente y resistencia del devanado de campo .

Para desarrollar el sistema de ecuaciones completo, es necesario expresar  $T_e$  e  $i_{fd}$  en función de las variables de estado  $\Delta\omega_r$ ,  $\Delta\delta$  y  $\Delta\psi_{fd}$ , tomando como base las ecuaciones 8 y 15.

En la sección 12.3.2 de [2], se desarrolla toda la metodología para determinar las ecuaciones lineales y calcular las constantes del modelo que incluye el efecto del devanado de campo en las oscilaciones del ángulo del rotor. El modelo se presenta en diagrama de bloques en la Figura 5.

La metodología expuesta para el cálculo de las constantes del modelo contiene variables y parámetros de la máquina síncrona no se detalla en este trabajo; sin embargo, para una mejor comprensión del modelo, las expresiones para calcular los coeficientes se simplifican de la siguiente manera:

$$K_1 = \frac{V_{iq0} V_b}{X_{qT}} \cos(\delta_0) + \frac{X_q - X_d'}{X_{dT}'} i_{q0} \text{sen}(\delta_0) \quad (16)$$

$$K_2 = \frac{V_b}{X_{dT}'} \text{sen}(\delta_0) \quad (17)$$

$$K_3 = \frac{X_{dT}'}{X_{dT}} \quad (18)$$

$$K_1 = \frac{X_d - X_d'}{X_{dT}'} V_b \text{sen}(\delta_0) \quad (19)$$

$$T_3 = K_3 T_{d0}' \quad (20)$$

donde

$$X_{dt}' = X_d' + X_E$$

$$X_{dt} = X_d + X_E$$

$$X_{qt} = X_q + X_E$$

$V_{iq0}$  e  $i_{iq0}$  son las componentes del voltaje terminal y de la corriente de armadura en el eje de cuadratura, como muestra el diagrama

fasorial de la Figura 6. En todas las ecuaciones se desprecia la resistencia de armadura y la resistencia equivalente del sistema.

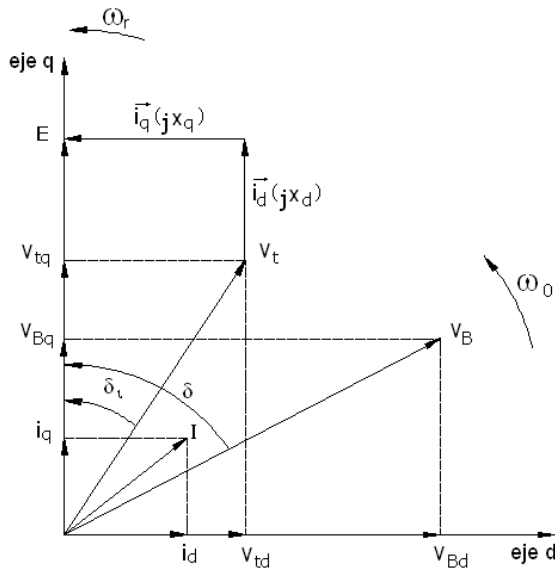


Figura 6. Diagrama Fasorial

$K_1$  es el coeficiente de torque sincronizante, el cual además incluye un componente torque que se debe a la variación de reluctancia de los polos salientes del rotor.

$K_2$  es el coeficiente que relaciona los cambios en el flujo de campo concatenado con el cambio en el torque eléctrico. Depende del punto de operación.

$K_3$  es el factor de impedancia, junto con  $T_3$  afectan la respuesta dinámica en la concatenación de flujo de campo. No depende del punto de operación. Estos parámetros definen la velocidad con la que el flujo de campo puede cambiar.

$K_4$  es el coeficiente que relaciona los cambios del ángulo de carga con cambios en las concatenaciones de flujo.

**Representación de la Saturación en la Dinámica del Circuito de Campo**

Se deben distinguir dos tipos de saturación:

(a) **Saturación total**, está relacionada con las magnitudes de flujos de campo y corrientes.

(b) **Saturación incremental**, está asociada con los valores de las perturbaciones de flujos de campo y corrientes.

La saturación afecta a las inductancias mutuas  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  a través del factor de saturación incremental  $K_{sd(inc)}$ .

$$L_{ads(inc)} = K_{sd(inc)} L_{ad} \quad (21)$$

$$L_{aqs(inc)} = K_{sd(inc)} L_{aq} \quad (22)$$

$$K_{sd(inc)} = \frac{1}{1 + B_{sat} A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{ar0} - \psi_{r1})}} \quad (23)$$

$K_{sd(inc)}$  es siempre menor a 1, por lo tanto la saturación se manifiesta reduciendo el valor de las inductancias mutuas. Al incluir  $L_{ads(inc)}$  y  $L_{aqs(inc)}$  dentro de los cálculos, se puede distinguir una clara reducción en el voltaje interno de la máquina y consecuentemente en los coeficientes del modelo.

**5. SISTEMA DE EXCITACIÓN**

Se incluyen dentro del modelo el sistema de excitación y los controles del regulador de voltaje, para añadir los efectos de las oscilaciones del rotor y del control externo de excitación sobre las variaciones del flujo de campo y por lo tanto en la estabilidad del sistema.

Para modelar el sistema de excitación, se debe considerar que la señal de entrada al regulador es generalmente el voltaje a los terminales de la armadura  $V_t$ . Por lo tanto es necesario definir  $V_t$  en función de las variables de estado  $\Delta\omega_r$ ,  $\Delta\delta$  y  $\Delta\psi_{fd}$ .

La ecuación lineal que define el efecto del sistema de excitación es:

$$\Delta V_t = \frac{V_{td0}}{V_{t0}} \Delta V_{td} + \frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \Delta V_{tq} \quad (24)$$

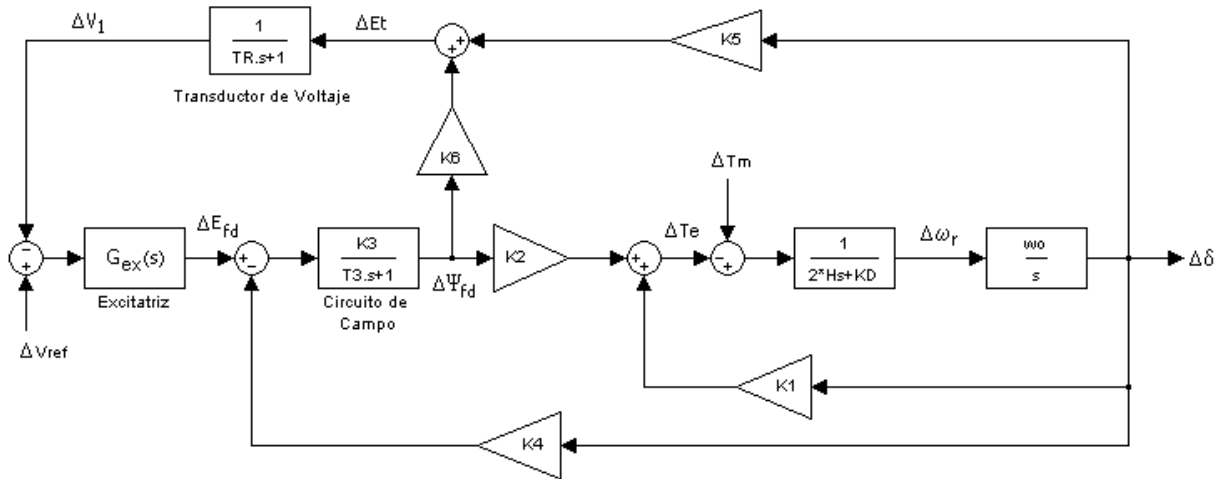


Figura 7. Modelo Lineal de un generador conectado a una barra infinita (Modelo de Heffron-Phillips)

y luego

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} \quad (25)$$

donde

$$K_5 = \frac{X_q}{X_{qT}} \frac{V_{d0}}{V_{t0}} V_b \cos(\delta_0) + \frac{X_d'}{X_{dT}'} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} V_b \sin(\delta_0) \quad (26)$$

$$K_6 = \frac{X_E}{X_{dT}'} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (27)$$

En la Figura 7 se muestra el diagrama de bloques que incluye los efectos del sistema de excitación. Algunos de estos efectos se obtienen analizando el diagrama de bloques:

- Las variaciones del flujo de campo son causadas por la reacción de armadura y por la variación del flujo de campo.
- El AVR afecta claramente a las dos componentes del torque, dicho efecto se manifiesta incrementando el torque sincronizante y disminuyendo el torque de amortiguamiento.
- El comportamiento del AVR depende de las condiciones de operación, como muestran las expresiones para los coeficientes  $K_5$  y  $K_6$ .

De la experiencia se ha encontrado que  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  y  $K_6$  son normalmente positivos mientras que  $K_5$  comúnmente es negativo aunque también puede ser positivo.

La reducción de torque de amortiguamiento debido al AVR provoca mayor número de oscilaciones, este problema puede solucionarse usando un estabilizador del sistema de potencia (PSS).

## 6. ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA (PSS)

Un PSS añade una señal suplementaria al sistema de excitación para controlar la transferencia de potencia activa [6].

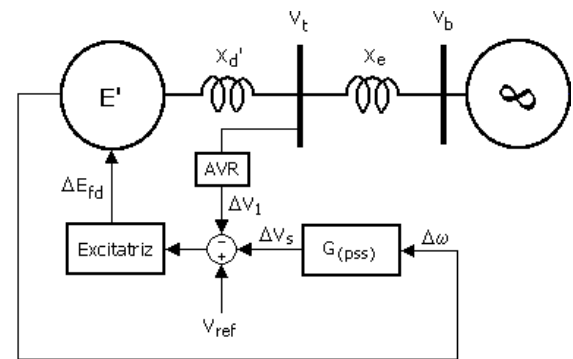


Figura 8. Acción del PSS en el Generador

La función básica del PSS es amortiguar las oscilaciones del rotor produciendo una componente de torque eléctrico en fase con la variación de la velocidad (torque de amortiguamiento) [2].

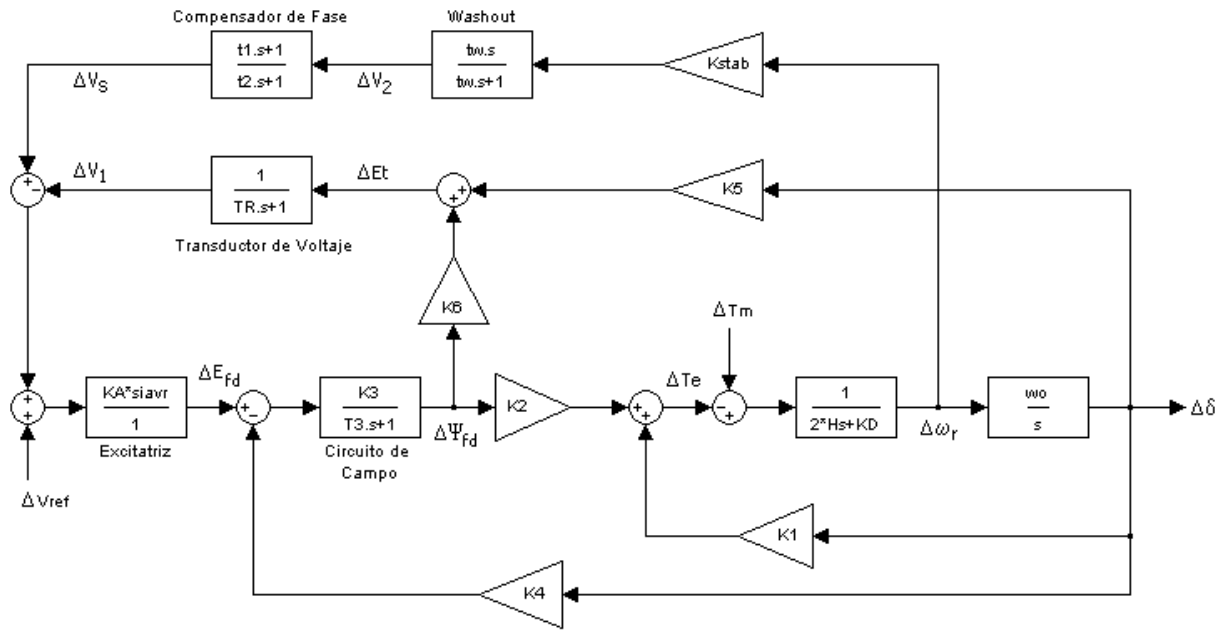


Figura 9. Modelo Lineal con AVR y PSS

La estructura típica de un PSS se muestra en la Figura 10, en la cual se distinguen tres etapas:

- (a) **Ganacia (Kstb)**, define la magnitud del torque de amortiguamiento creado por el estabilizador.
- (b) **Washout**, es un filtro pasa altos, evita que el estabilizador responda ante cualquier variación en la velocidad que no necesariamente puede ser una perturbación. Es decir, actúa únicamente cuando las variaciones de velocidad son oscilatorias.
- (c) **Compensador de Fase**, crea un adelanto de fase para compensar el atraso de fase entre la entrada a la excitatriz y la variación del torque eléctrico.

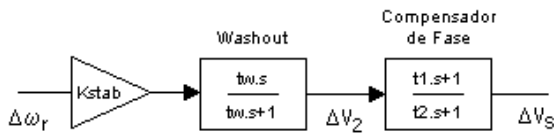


Figura 10. Estabilizador del Sistema de Potencia

El PSS es usado en estabilidad de pequeña señal de un generador, pero ésta no es su única función, pues además debe garantizar la estabilidad de todo el sistema.

En la figura 9 se incluye la acción del PSS al modelo propuesto anteriormente.

## 7. DESARROLLO DEL PROGRAMA

La simulación de los modelos se realiza con el programa MATLAB y su herramienta **SIMULINK**. En las Figuras 11 y 12 se detallan las interfaces para ingreso de datos y análisis gráfico.

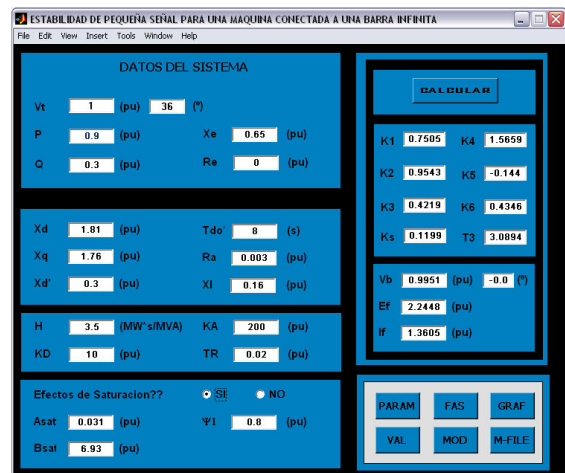


Figura 11. Interfaz para Ingreso de Datos

Se presentan varias opciones que pueden ser útiles para el análisis de estabilidad de pequeña señal, como cálculo de constantes y parámetros de la máquina sincrónica, diagrama fasorial de los voltajes y corrientes del sistema, simulación de perturbaciones en el dominio del tiempo y análisis en el dominio



de la frecuencia mediante cálculo de valores propios, diagramas de Nyquist, diagramas de Bode y gráfico de polos y ceros.

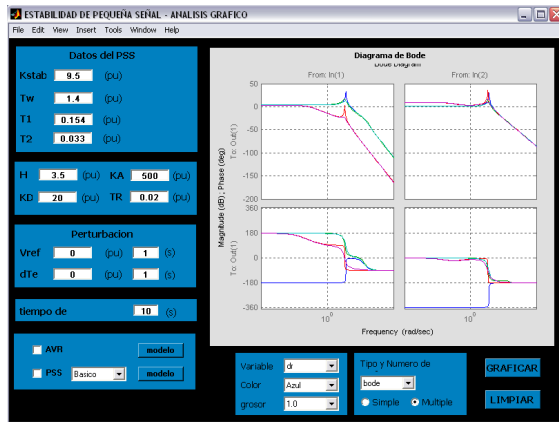


Figura 12. Interfaz de Análisis Gráfico

El programa es útil para la calibración de los parámetros del sistema de excitación y del PSS.

7. CASO DE ESTUDIO

Se presenta el análisis de estabilidad de pequeña señal, aplicado a una unidad de la face C de Paute. Cabe recalcar que Paute es la mayor central del sistema ecuatoriano y que contribuye mayormente a su estabilidad.

A. Datos

Tabla 1. Parámetros de la Máquina y del Sistema

Parámetro	Valor (pu)	Parámetro	Valor (pu)
$X_d$	1,04	$H$	3,30
$X_d'$	0,28	$K_D$	0
$X_q$	0,63	$A_{sat}$	0
$X_l$	0,10	$B_{sat}$	0
$R_a$	0	$X_E$	0,1239
$T_{d0}'$	6,95 (s)	$R_E$	0,0013

Fuente: Transelectric

Tabla 2. Parámetros del AVR y del PSS

Variable	Valor	Variable	Valor (pu)
$K_{stab}$	1,9	$K_A$	100
$T_1$	2	$T_R$	0,022
$T_2$	0,004		
$T_w$	6,8		

Fuente: Transelectric

Tabla 3. Datos del Flujo de Potencia

Variable	Valor (pu)	Variable	Valor (pu)
$P$	0,60	$V_t$	1,03   $0^\circ$
$Q$	0,26	$V_b$	1,0   $-4,1^\circ$

B. Resultados

Tabla 4. Parámetros Adicionales de la Máquina

Constante	Valor (pu)	Constante	Valor (pu)
$L_{adu}$	0,94	$L_f$	0,22
$L_{adu}'$	0,18	$R_f$	0,0004
$L_{aqu}$	0,53	$K_{sd}$	1
$L_{ds}$	1,04	$K_{sq}$	1
$L_{ds}'$	0,28	$K_{sd(inc)}$	1
$L_{qs}$	0,63	$K_{sq(inc)}$	1

Tabla 5. Coeficientes del Modelo

Constante	Valor (pu)	Constante	Valor (pu)
$K_1$	1,691	$K_5$	-0,009
$K_2$	0,732	$K_6$	0,238
$K_3$	0,429	$K_S$	1,019
$K_4$	0,679	$T_3$	2,411

Tabla 6. Corrientes y Voltajes

Var.	Valor (pu)	Var.	Valor (pu)
$E_f$	1,41	$I_a$	0,63   $-23,4^\circ$
$I_f$	1,50	$I_d$	0,41   $-72,9^\circ$
$E$	1,41   $17,1^\circ$	$I_q$	0,48   $17,09^\circ$

C. Simulación

En base a los coeficientes y parámetros calculados, se presentan diferentes simulaciones en el dominio del tiempo para demostrar la utilidad del programa.

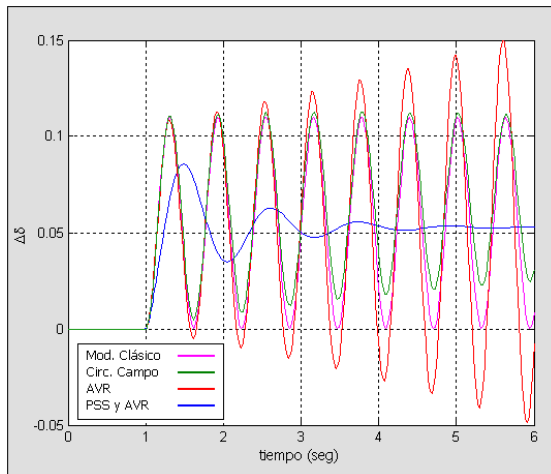
C.1 Efecto del circuito de campo, AVR y PSS

Con el fin de ver la influencia de la dinámica del circuito de campo, AVR y PSS, se determinan los valores propios para cada caso y también se calculan las constantes del torque sincrónico y de amortiguamiento, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Valores Propios, efecto del circuito de campo, AVR y PSS

Caso	Valor Propio	$K_S$	$K_D$
Mod. Clásico	$0 + 12.342i$	2,667	0
Circ. Campo	$-0.048 + 10.19i$	1,818	0,63
AVR	$0.133 + 10.26i$	1,84	-1,75
AVR y PSS	$1,08 + 5,6i$	0,571	14,25

El análisis de estabilidad de pequeña señal se puede hacer a partir de observar los valores propios. Normalmente los valores propios ocurren en pares conjugados, la parte real representa el amortiguamiento y la parte imaginaria la frecuencia de oscilación.



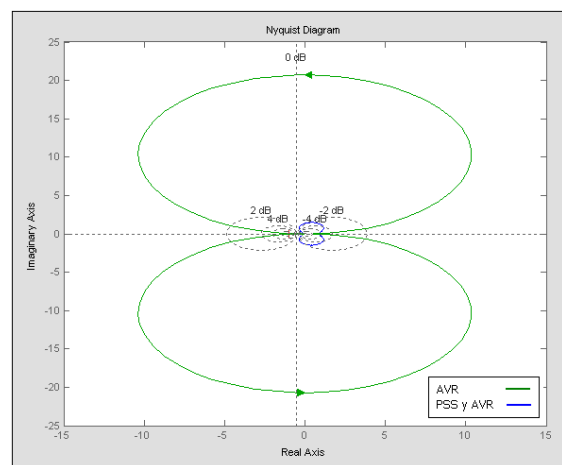
**Figura 13.** Variación del ángulo del rotor frente a una variación en el torque mecánico, efectos del circuito de campo, AVR y el PSS

El circuito de campo y el PSS se manifiestan con una reducción del torque sincronizante y un aumento del torque de amortiguamiento. Por el contrario, el AVR incrementa el torque sincronizante pero reduce notablemente el torque de amortiguamiento, tanto es así que el sistema se vuelve inestable debido al AVR. La inestabilidad del sistema sin PSS se puede identificar en la parte real positiva del valor propio. Cuando la parte real es negativa, el modo oscilatorio es decreciente.

La frecuencia de oscilación es inversamente proporcional a la magnitud de la parte imaginaria del valor propio. El efecto del circuito de campo y AVR, presenta frecuencias de oscilación similares a la del modelo clásico. El PSS disminuye la frecuencia de las oscilaciones en aproximadamente la mitad de los anteriores casos.

Se aprecia claramente que la falta de torque de amortiguamiento debido al AVR provoca oscilaciones crecientes del ángulo, las mismas que son amortiguadas rápidamente con el uso del PSS.

Los estudios de estabilidad de pequeña señal normalmente se realizan en el dominio de la frecuencia, una de las herramientas usadas para determinar la estabilidad de un sistema es el diagrama de Nyquist. La inestabilidad del sistema sin PSS se puede analizar en los diagramas de la figura 14.

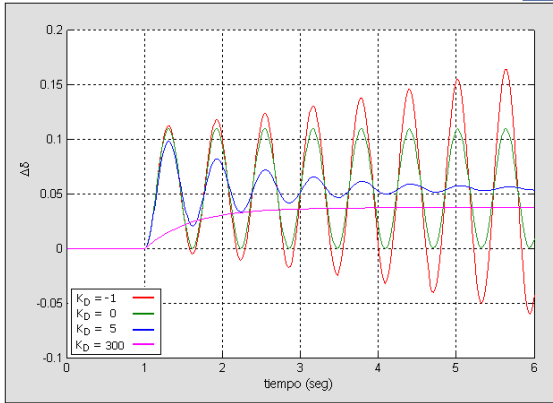


**Figura 14.** Diagrama de Nyquist para  $\Delta T_m$

### C.2 Efecto de $K_D$

Como se mostró en el caso anterior, el circuito de campo, el AVR y el PSS influyen en el valor de la constante de amortiguamiento  $K_D$  (torque de amortiguamiento). Sin embargo, esta constante depende de otros factores; por lo tanto, es difícil conocer su valor exacto. Existen métodos prácticos que permiten determinar el valor de  $K_D$ , mediante el análisis de transitorios con osciloperturbógrafos.

Para identificar el efecto de la constante  $K_D$ , se utiliza únicamente el modelo clásico del generador. El efecto de  $K_D$  es fácilmente visible en la figura 15.



**Figura 15.** Variación del ángulo del rotor para diferentes valores de  $K_D$ , modelo clásico

**Tabla 8.** Valores Propios, efecto de  $K_D$

$K_D$	$K_S$	Valor Propio
-1	2,653	0.076 +12.31i
0	2,653	0 +12.311i
5	2,653	-0.379 +12.305i
300	2,653	-41.832

Si  $K_D \leq 0$ , el sistema es inestable, debido a insuficiente torque de amortiguamiento, en el primer caso se tienen oscilaciones de magnitud constante durante todo el tiempo, y en el segundo caso se tiene un modo oscilatorio creciente. Cuando  $K_D > 0$  las oscilaciones se amortiguan y para una constante de amortiguamiento muy grande, no existen oscilaciones tal característica se manifiesta en un valor propio real negativo.

**C.3 Efecto de la Saturación**

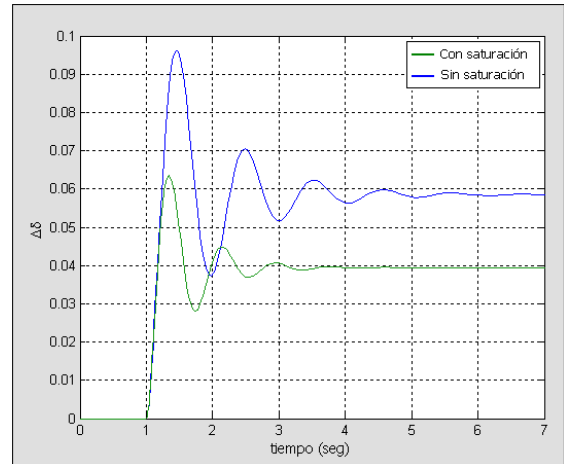
La saturación actúa disminuyendo el valor de las inductancias mutuas de la máquina y por lo tanto se reduce el voltaje interno  $E$ . Para esta simulación se consideró:  $A_{sat} = 0,031$ ;  $B_{sat} = 6,93$  y  $\psi_1 = 0,98$  [2].

**Tabla 9.** Valores Propios, efecto de saturación.

Caso	Valor Propio	$K_S$	$K_D$
Sin Sat.	-1.11 + 6.11i	0,67	14,65
Con Sat.	-1.89 + 7.89i	1,15	24,99

El efecto de saturación se manifiesta con un claro aumento de los torques sincronizante y de amortiguamiento. Por tanto, el ángulo presenta

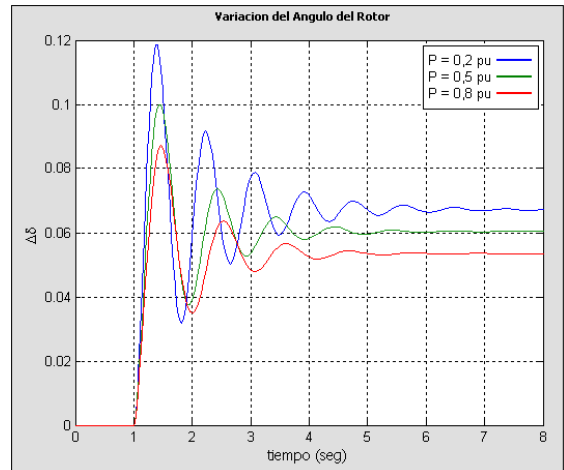
menos oscilaciones y se estabiliza en un valor menor.



**Figura 16.** Efecto de la Saturación, Modelo con AVR y PSS

**C.4 Efecto de la Carga del Generador**

Ahora se analiza el comportamiento del sistema, para diferentes valores de potencia entregadas por el generador, se considera un factor de potencia constante e igual a 0,9.



**Figura 17.** Efecto de la Saturación, Modelo con AVR y PSS

El incremento de la potencia entregada por el generador, provoca una reducción en el torque sincronizante, sin embargo el torque de amortiguamiento aumenta.

**Tabla 10.** Valores Propios, efecto de la carga del Generador.

P	Q	Valor Propio	$K_S$	$K_D$
0	0	-0.01 + 8.96i	1,40	0,117
0,2	0,097	-0.86 + 5.03i	1,00	11,78
0,5	0,24	-1.11 + 6.37i	0,73	14.65
0,8	0,38	-1.12 + 5.90i	0,63	14,83

Cuando la máquina trabaja con potencias muy bajas, las perturbaciones presentan oscilaciones más fuertes, el torque de amortiguamiento es insuficiente.

## 9. CONCLUSIONES

Las limitaciones económicas y ambientales que impiden la expansión de los sistemas eléctricos de potencia frente a un notable crecimiento de la demanda, han hecho que los sistemas de potencia operen en condiciones de alto riesgo de inestabilidad aún cuando las perturbaciones son de pequeña magnitud. El uso de controles en la excitación de las máquinas, representa una solución a estos problemas, sin embargo una mala calibración de los parámetros de dichos controles puede llevar a problemas aún mayores. De ahí, los estudios de estabilidad de pequeña señal son importantes para la coordinación de los equipos de control del sistema.

El AVR presenta una clara disminución del torque de amortiguamiento, que puede llegar a ocasionar pérdida de estabilidad cuando la constante de amortiguamiento  $K_D$  es negativa, debido a que la ganancia del regulador de voltaje es muy alta. Esto se manifiesta en oscilaciones que no pueden ser amortiguadas. Una solución es el PSS, pero en generadores que no disponen de este equipo, es necesario calibrar adecuadamente la ganancia del regulador.

\ Mientras mayor es la potencia entregada por la máquina, el sistema es menos sensible a las variaciones de potencia, de ahí se recomienda operar a la mayor potencia permitida por los límites de cargabilidad de la máquina.

## REFERENCIAS

[1] IEE/CIGREE Report, "Definition and Classification of Power System Stability", IEE/CIGREE Join Task Force, May 2004.

[2] P. Kundur, "Power Systems Stability and Control", McGraw-Hill, 1994, chap 12  
 [3] IEE-PES Report, "Effects of Limits in Small Signal Stability Analysis of power Systems", IEE-PES Summer Meeting, July 2001.  
 [4] I. Dobson, "Strong Resonance Effects in Norm Form Analysis and Subsynchronous Resonance", Japan, August 2001.  
 [5] N. Sotomayor, "Calibración de las PSSs de la Fase C de la Central Paute", tesis de grado, EPN, Quito, 2004.  
 [6] O. Samuelsson, B. Eliasson, G. Olsson, "Power Oscillations Damping with Controlled Active Loads", Sweden  
 [7] F. Morales, A. Cipriano, H. Rudnik, "Evaluación de Técnicas basadas en conocimiento para el diseño de controles de excitación en Sistemas de Potencia", PUCC, Chile.

## BIOGRAFÍA

### Rommel Aguilar Chiriboga

Nació en Yaruquí, el 27 de julio de 1981. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto nacional Mejía, en Quito. Actualmente está realizando su proyecto de titulación para obtener el título de ingeniero eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional.



### Jesús Játiva

Ingeniero Eléctrico (EPN 1981), Master of Science en Ingeniería Eléctrica y Doctor of Philosophy, Universidad de Texas en Arlington, USA (UTA 1988 y 1991), Miembro Postdoctoral en el Energy Systems Control Center (UTA 1991), Diplomado con Distinción en Técnicas de Planificación para el Desarrollo (Economía), Institute of Social Studies, Los Países Bajos (ISS 1998) y el Diplomado en Energy Conservation in Industry de ÅF-Energikonsult Syd AB, Suecia (1995). Actualmente es profesor Principal de la EPN y Jefe del Departamento de Energía Eléctrica.