

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROL DE VELOCIDAD Y TENSIÓN PARA UN GENERADOR SÍNCRÓNICO - PARTE II

BOTERO C., HECTOR A. - SARMIENTO M., HENRY O. - ALVAREZ S., JOSE L.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento para simular el generador síncrono (*Parte I*) y diseñar controladores óptimos (*Parte II*), con la ayuda de herramientas de fácil trabajo y amplia divulgación como son MATLAB y su módulo de simulación SIMULINK.

## INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería eléctrica moderna es necesario modelar el comportamiento dinámico de las máquinas síncronas para el diseño de reguladores que garanticen cambios pequeños en las variaciones de tensión y frecuencia alrededor de valores establecidos. Sin embargo los modelos de los generadores son complejos y los programas de simulación que se tienen para simplificar la manipulación matemática no son de uso común, ya que la forma en que se ingresan los datos es tediosa y se requiere de mucha experiencia y conocimiento.

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento para simular el generador y diseñar controladores óptimos, con la ayuda de herramientas de fácil trabajo y amplia divulgación como son MATLAB y su módulo de simulación SIMULINK.

MATLAB es un programa matemático que trabaja con base en matrices y que incluye comandos para la simulación de sistemas lineales. SIMULINK es un ambiente gráfico de simulación de sistemas dinámicos basado en diagramas de bloques [13][15].

Hasta hoy se han hecho esfuerzos para la modelación de los generadores síncronos. Los modelos se describen con ecuaciones diferenciales no lineales,

con coeficientes variables debido al cambio de las inductancias de la máquina con la posición del rotor. Desde 1929 la modelación de la máquina síncrona se ha simplificado, con la aplicación de las transformaciones de Park-Concordia, las cuales eliminan la variación en los coeficientes de las ecuaciones diferenciales al proyectar todos los fenómenos electromagnéticos y electromecánicos sobre un marco de referencia [1][3].

Con el conjunto de ecuaciones ubicadas sobre el marco de referencia seleccionado, se realiza la manipulación para definir las variables por integrar y obtener así la respuesta del sistema ante cambios en las entradas: tensión de campo y par mecánico [4][5].

En este trabajo se presentan los resultados del diseño y la simulación de un control óptimo de tensión y velocidad para un generador síncrono. El diseño del controlador se hace por dos métodos: un primer método propuesto en [7], y un segundo [9] basado en la ecuación matricial de Riccati. Ambos métodos son aplicables para sistemas lineales; los controladores obtenidos son aplicados tanto al modelo lineal como al no lineal, para diferentes valores de potencia activa. La simulación del modelo lineal se hace con programación en MATLAB [13] y la del modelo no lineal se hace con diagramas de bloques en

SIMULINK. Como resultado de las simulaciones se obtienen gráficos que muestran la respuesta en el tiempo de las principales variables de la máquina síncrona.

Los resultados muestran que el controlador basado en la ecuación de Riccati presenta un mejor comportamiento; esto se refleja en una mejor respuesta transitoria de las variables en comparación con los resultados obtenidos en el otro método. Sin embargo en todos los casos las variables del sistema no lineal adquieren mayores desviaciones, sobrepicos y tiempos de establecimiento, comparadas con el sistema lineal. El esfuerzo de control para todos los casos es mayor en el sistema no lineal que en el lineal.

Por ultimo, este trabajo constituye una mejora de trabajos anteriores realizados por algunos de los autores [12][14].

## DISEÑO DEL CONTROLADOR ÓPTIMO

Antes de diseñar el controlador se debe retomar el modelo del generador síncrono que viene determinado por el conjunto de ecuaciones no lineales (1), (2), (3) y (4).

Eje d:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d &= \omega_0 * V_d - \frac{\omega_0 * r_d}{X_{ld}} * \Psi_d + \frac{\omega_0 * r_d}{X_{ld}} * \Psi_{md} + \omega * \Psi_q \\
 p\Psi_{kd} &= 0 - \frac{\omega_0 * r_{kd}}{X_{lkd}} * \Psi_{kd} + \frac{\omega_0 * r_{kd}}{X_{lkd}} * \Psi_{mdq} \\
 p\Psi_d &= \omega_0 * V_d - \frac{\omega_0 * r_d}{X_{ld}} * \Psi_d + \frac{\omega_0 * r_d}{X_{ld}} * \Psi_{md} + \omega * \Psi_q \\
 p\Psi_f &= \omega_0 * V_f - \frac{\omega_0 * r_f}{X_{lf}} * \Psi_f + \frac{\omega_0 * r_f}{X_{lf}} * \Psi_{md} \\
 \Psi_{md} &= \frac{X_{ad}}{X_{ld}} * \Psi_d + \frac{X_{ad}}{X_{lkd}} * \Psi_{kd} + \frac{X_{ad}}{X_{lf}} * \Psi_f \\
 \frac{1}{X_{ad}} &= \frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ld}} + \frac{1}{X_{lkd}} + \frac{1}{X_{lf}} \\
 \frac{1}{X_{ad}} &= \frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{lq}} + \frac{1}{X_{lkq}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Eje q:

$$p\Psi_q = \omega_0 * V_q - \frac{\omega_0 * r_q}{X_{lq}} * \Psi_q + \frac{\omega_0 * r_q}{X_{lkq}} * \Psi_{mq} - \omega * \Psi_d$$

$$p\Psi_{kq} = 0 - \frac{\omega_0 * r_{kq}}{X_{lkq}} * \Psi_{kq} + \frac{\omega_0 * r_{kq}}{X_{lkq}} * \Psi_{mq} \tag{2}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{X_{aq}}{X_{lq}} * \Psi_q + \frac{X_{aq}}{X_{lkq}} * \Psi_{kq}$$

Ecuaciones electromecánicas:

$$\begin{aligned}
 \tau_e &= i_q * \Psi_d - i_d * \Psi_q \\
 \tau_m - \tau_e &= \frac{2 * H * P_o^2}{\omega_0} * p(p\delta)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$p\delta = \omega - \omega_0$$

Ecuaciones de conexión a la barra infinita:

$$\begin{aligned}
 \omega_0 * V_d &= \omega_0 * |V_a| * \sin(\delta) + \omega_0 * i_d * r_e - \omega * X_e * i_q \\
 \omega_0 * V_q &= \omega_0 * |V_a| * \cos(\delta) + \omega_0 * i_q * r_e + \omega * X_e * i_d
 \end{aligned} \tag{4}$$

Donde:

- $X_d$ : Reactancia síncrona de eje d
- $X_q$ : Reactancia síncrona de eje q
- $X_f$ : Reactancia de campo
- $X_{kd}$ : Reactancia de la bobina de amortiguamiento de eje d
- $X_{kq}$ : Reactancia de la bobina de amortiguamiento de eje q
- $X_{ld}$ : Reactancia de dispersión eje d
- $X_{lq}$ : Reactancia de dispersión eje q
- $X_{lf}$ : Reactancia de dispersión de campo
- $X_{lkd}$ : Reactancia de dispersión de la bobina de amortiguamiento de eje d
- $X_{lkq}$ : Reactancia de dispersión de la bobina de amortiguamiento de eje q
- $V_d$ : Tensión estática en el circuito del eje d
- $V_q$ : Tensión estática en el circuito del eje q
- $V_f$ : Tensión de campo
- $V_{kd}$ : Tensión en la bobina de amortiguamiento del eje d
- $V_{kq}$ : Tensión en la bobina de amortiguamiento del eje q
- $r_d$ : Resistencia de las bobinas estáticas en el eje d
- $r_q$ : Resistencia de las bobinas estáticas en el eje q
- $r_f$ : Resistencia de la bobina de campo
- $r_{kd}$ : Resistencia de la bobina de amortiguamiento de eje d
- $r_{kq}$ : Resistencia de la bobina de amortiguamiento de eje q
- $X_{md}$ : Inductancia magnetizante del circuito del eje d
- $X_{mq}$ : Inductancia magnetizante del circuito del eje q
- $\psi_d$ : Flujo ligado del estator en el eje d
- $\psi_q$ : Flujo ligado del estator en el eje q
- $\psi_f$ : Flujo ligado de campo
- $\psi_{kd}$ : Flujo ligado de la bobina de amortiguamiento del eje d
- $\psi_{kq}$ : Flujo ligado de la bobina de amortiguamiento del eje q
- $\omega$ : Frecuencia angular
- $r_e$ : Resistencia de la línea de transmisión
- $x_e$ : Reactancia de la línea de transmisión
- $V_a$ : Tensión de la barra infinita
- $\delta$ : Angulo de carga
- $p$ : Factor d/dt
- $\tau_e$ : Par electromagnético
- $\tau_m$ : Par mecánico
- $H$ : Constante de Inercia
- $P_o$ : Número de pares de polos

Como las metodologías de control que se utilizan sólo son aplicables a sistemas lineales, las ecuaciones que describen el comportamiento del generador síncrono son linealizadas alrededor de un punto de operación y se obtiene el sistema matricial (5).

$$\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ w_0 V_{\Delta} \\ 0 \\ 0 \\ T_{m\Delta} \\ 0 \end{matrix} \begin{vmatrix} w_0(r_d+r_e) & 0 & 0 & -w_0(x_q+x_e) & w_0 x_{mq} & \psi_{q0} - x_e i_{q0} & w_0 v \cos \delta_0 \\ 0 & w_0 r_{kd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_0 r_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -w_0(x_d+x_e) & -w_0 x_{md} & -w_0 x_{md} & w_0(-x_q+r_e) & 0 & -\psi_{d0} + x_e i_{d0} & -w_0 v \sin \delta_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_0 r_{kq} & 0 & 0 \\ -\psi_{q0} - x_d i_{q0} & x_{md} i_{q0} & x_{md} i_{q0} & \psi_{d0} + x_q i_{d0} & -x_{mq} i_{d0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} i_{d\Delta} \\ i_{kd\Delta} \\ i_{fd\Delta} \\ i_{qd\Delta} \\ i_{kq\Delta} \\ w_{\Delta} \\ \delta_{\Delta} \end{matrix}$$

$$+ \begin{matrix} x_d & -x_{md} & -x_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{md} & x_{kd} & x_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{md} & x_{md} & x_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_q & -x_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_{mq} & -x_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2H/w_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} P \begin{matrix} i_{d\Delta} \\ i_{kd\Delta} \\ i_{fd\Delta} \\ i_{qd\Delta} \\ i_{kq\Delta} \\ w_{\Delta} \\ \delta_{\Delta} \end{matrix} \quad (5)$$

En el sistema descrito por (5) cada variable de estado representa el cambio alrededor de un punto de operación y por eso el subíndice  $\Delta$ ; el subíndice 0 indica las condiciones iniciales. En esta representación las variables de estado son cambios en las corrientes, ángulo de carga y velocidad angular.

Para el diseño del controlador se utilizaron dos técnicas. La primera fue propuesta en [7], [10], que se denominará metodología 1, y la segunda se fundamenta en la ecuación matricial de Riccati [9], [11], y se denominará metodología 2. En ambas metodologías se pretende minimizar el índice de comportamiento cuadrático de la forma:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T * Q * X + U^T * R * U) dt \quad (6)$$

El primer término de la ecuación (6) considera las desviaciones de las variables de estado desde el punto de operación y el segundo término tiene en cuenta el peso del esfuerzo de control, es decir el gasto de energía de las señales de control.

El sistema físico viene representado por la ecuación de estado:

$$pX=A*X+B*U \quad (7)$$

La ecuación (7) se obtiene de manipular el sistema matricial (5).

La ley de control es de la forma:

$$U= - K*X \quad (8)$$

Donde:

- A: Matriz de la planta
- B: Matriz de salida
- X: Vector de estado
- Q: Matriz de peso para el vector de estado
- U: Esfuerzo de control
- R: Matriz de peso para el esfuerzo de control
- K: Matriz de ganancias de realimentación

Las salidas del sistema no son necesariamente las mismas variables de estado, por lo tanto la ecuación para las salidas es:

$$Y=C*X \quad (9)$$

Las ecuaciones (7), (8) y (9) se representan en la figura 1.

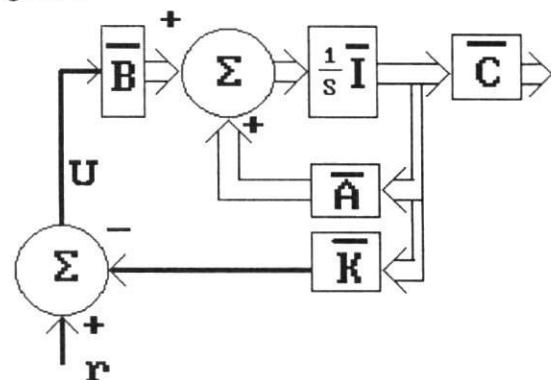


Figura 1. Sistema controlado con realimentación lineal de las variables de estado

La señal  $U$  es la tensión de campo del generador. Las matrices de peso  $Q$  y  $R$  en la ecuación (6) deben ser definidas positivas y simétricas [9].

En la figura 2 se ilustra el diagrama de simulación en SIMULINK para el sistema no lineal con realimentación de estados; para esto se utiliza el conjunto de ecuaciones (1), (2), (3) y (4). Las constantes de realimentación quedan en el subsistema 14.

Las metodologías utilizadas para obtener la ley de control  $U=-KX$ , solo son aplicables para sistemas lineales [8], por lo tanto se utilizará el sistema mostrado en (5) para efectos de diseño.

Se realizó la simulación del sistema lineal en lazo abierto con la herramienta computacional MATLAB. Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4.

Los datos de entrada fueron:

Potencia activa,  $P=0.9$

Factor de potencia,  $F.P.=0.86$

Tensión en terminales del generador,  $V=1$

El cambio en la tensión de campo fue un incremento del 10%.

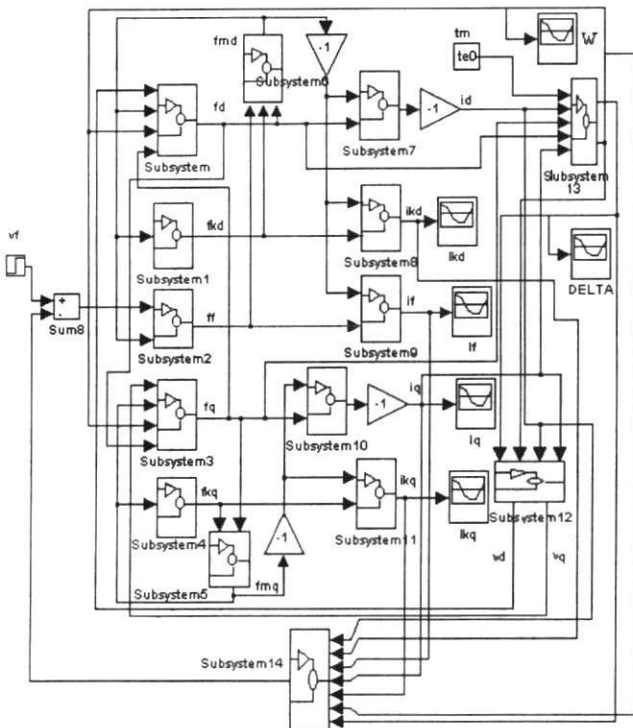


Figura 2. Diagrama de simulación en lazo cerrado en SIMULINK, para el sistema no lineal

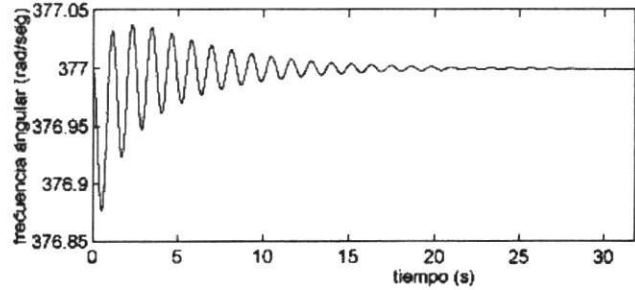


Figura 3. Frecuencia angular vs tiempo - Sistema lineal en lazo abierto.

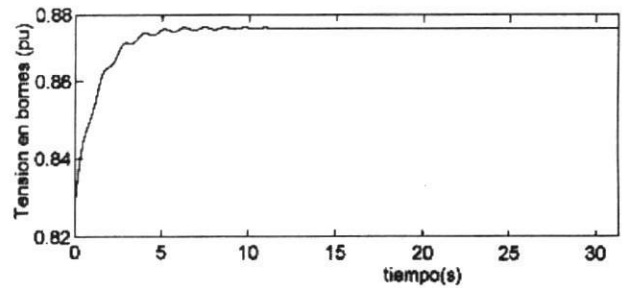


Figura 4. Tensión en bornes vs tiempo - Sistema lineal en lazo abierto

## DISEÑO Y SIMULACIÓN CON METODOLOGÍA 1

El control óptimo lineal (L.O.C.) es un caso particular del diseño de controladores por realimentación lineal de las V.E. Su facilidad de manejo permite seguir la ubicación de los polos de lazo cerrado y minimizar una función de costo cuadrática para predecir el comportamiento del sistema controlado.

Partiendo del sistema (5), se encuentra la matriz de transformación  $T$  que lleva (5) a la forma canónica controlable (F.C.C.) para simplificar el proceso de ubicación de polos.

La F.C.C. viene dada por:

$$pY_c = F_0 Y_c + G_0 U \quad (10)$$

En (10)  $F_0$  y  $G_0$  son:

$$\overline{F_0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots & \dots & \dots & -\alpha_n \end{bmatrix}$$

$$G_0 = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T \tag{11}$$

El polinomio característico del sistema (10) es:

$$\lambda I - F_0 = \lambda^n + \alpha_n \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_1 \tag{12}$$

Para el diseño del L.O.C, se supone un índice de comportamiento cuadrático para el sistema (10), como se muestra en (6), [9].

Debido a que el sistema matricial (10) está en la F.C.C, las matrices de peso Q y R son:

$$Q = qI_n \tag{13}$$

$$R = rI_r \tag{14}$$

Donde q y r son escalares,  $I_n$  e  $I_r$  son matrices identidad de diferente orden.

Siguiendo el procedimiento recomendado en [10], se obtiene que la ecuación que contiene las raíces del sistema con control óptimo es:

$$\lambda I - F_0 \left| \lambda I + F_0^t \right| + (-1)^n \frac{q}{r} = 0 \tag{15}$$

Los valores propios del polinomio (15) son simétricos con respecto al eje imaginario del plano complejo y solamente los valores propios que tengan parte real negativa son de interés para el control.

Llamando  $S_0$  el vector de orden  $(1*n)$  de ganancias de realimentación en la F.C.C, el sistema (10) realimentado queda:

$$Y_c = (F_0 - G_0 S_0) Y + G_0 U \tag{16}$$

cuyos valores propios son:

$$|\lambda I - (F_0 - G_0 S_0)| = \lambda^n + (\alpha_n + \beta_n) \lambda^{n-1} + \dots + (\alpha_1 + \beta_1) \tag{17}$$

y de las raíces elegidas al resolver (15), para un valor determinado de q/r, pueden seleccionarse:

$$(\lambda - \hat{\lambda}_1)(\lambda - \hat{\lambda}_2) \dots (\lambda - \hat{\lambda}_n) = \lambda^n + \hat{\alpha}_n \lambda^{n-1} + \dots + \hat{\alpha}_1 \tag{18}$$

con todo  $\hat{\alpha}_i$  conocido.

Se tiene por comparación del polinomio (18) con (17) que:

$$\beta_i = (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \tag{19}$$

El vector  $S_0$  será:

$$S_0 = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_n] \tag{20}$$

y como el control se realizará para el modelo representado por (5), se transforma en  $S_0$  para encontrar K por medio de la matriz T.

$$K = S_0 T^{-1} \tag{21}$$

Con lo que se determina el controlador.

Un excelente texto para profundizar en esta metodología es [10].

En esta metodología, no es necesario seleccionar las matrices de peso Q y R sino la relación q/r [7], [10] y [17]. Para nuestro caso con una relación q/r de  $2 \times 10^{24}$  las constantes de realimentación obtenidas fueron:

$$K(1) = -25.65; K(2) = 25.83; K(3) = 27.54; K(4) = -3.18; K(5) = 4.41 \\ K(6) = -10.51; K(7) = -41.62$$

Los resultados del sistema controlado se muestran en las figuras 5 a 7 para el sistema lineal, y las figuras 8 a 10 para el sistema no lineal. Las simulaciones se hicieron para valores de potencia activa  $P=0.5$ ,  $P=0.9$ ,  $P=1.2$  y en todos los casos  $F.P.=0.86$  y  $V=1$ . La entrada al sistema es un incremento del 10% en la tensión de excitación.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN CON METODOLOGÍA 2

Para el diseño utilizando la ecuación de Riccati, se parte de un sistema invariante en el tiempo de la forma:

$$pX=A*X \quad (22)$$

Para este sistema se define una función de Liapunov definida positiva, de la forma:

$$V(X)=X^T * P * X \quad (23)$$

donde P es una matriz hermítica definida positiva.

La derivada respecto al tiempo de (23) es:

$$pV(X)=X^T *(A^T * P + P * A) * X \quad (24)$$

La función pV(X) debe ser definida negativa para que el sistema tenga estabilidad asintótica en el sentido de Liapunov. Por lo tanto:

$$pV(X)=-X^T * Q * X \quad (25)$$

donde:

$$Q=-(A^T * P + P * A) \quad (26)$$

Por lo tanto, es suficiente que Q sea definida positiva para que el sistema sea estable.

Para la optimización del controlador se utiliza el segundo método de Liapunov y se tiene la seguridad de que el sistema funcionará, es decir la salida del sistema se dirigirá constantemente hacia un valor deseado. Entonces el sistema diseñado tiene una configuración con característica de estabilidad inherente.

Procediendo con lo descrito anteriormente para el sistema dado por las ecuaciones (7), (8) y el índice de desempeño (6), se obtiene la siguiente ecuación:

$$A^T * P + P * A - P * B * R^{-1} * B^T * P + Q = 0 \quad (27)$$

que se conoce como la ecuación de la matriz reducida de Riccati [9].

Para resolver la ecuación (27) se utilizó el comando LQR de MATLAB que pide como datos de entrada las matrices A, B, Q, R y entrega como resultado las ganancias de realimentación. Las matrices de peso Q y R se seleccionaron realizando varias simulaciones hasta obtener resultados que mostraron bajos sobrepicos, pequeños tiempos de establecimiento y valores bajos en el esfuerzo de control. Los mejores resultados se obtuvieron con:

$$Q=\text{Diagonal}(10,10,10,10,10,10,10) \text{ y } R=0.3$$

Los valores obtenidos para K fueron:

$$K(1)=-21.56; K(2)=20.67; K(3)=24.92; K(4)=-1.71; K(5)=2.52 \\ K(6)=-5.20; K(7)=-13.09$$

Los resultados de la simulación se observan en las figuras 11 a 13 para el sistema lineal y 14 a 16 para el sistema no lineal. Las simulaciones se hicieron para P=0.5, P=0.9, P=1.2 y en todos los casos F.P.=0.86 y V=1. La entrada al sistema es un incremento del 10% en la tensión de excitación.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Simulación del generador en lazo abierto:

Se realizó la simulación para el sistema en lazo abierto utilizando el modelo lineal implementado en MATLAB. La entrada al sistema fue un incremento en la tensión de excitación del 10%. Los resultados se observan en las figuras 3 y 4. El tiempo de establecimiento es alto para la tensión en bornes y para la velocidad angular. Esta respuesta transiente es nociva para las cargas conectadas al sistema porque existen equipos altamente sensibles a los cambios en la tensión, como las máquinas de inducción, cuyo par mecánico es proporcional al voltaje al cuadrado. Es decir si la tensión cae x fracción, el par mecánico cae x<sup>2</sup> fracción, lo que conlleva a calentamiento en los devanados y reducción de la vida útil.

Por otro lado muchos sistemas industriales utilizan relojes sincronizados con la línea de alimentación de 60 ciclos, es decir una frecuencia angular de 377 rad/s. Si la frecuencia cambia u oscila bruscamente dichos sistemas salen de sincronismo.

Así, las respuestas obtenidas en la simulación no son admisibles en un sistema de potencia.

### **Simulación del generador en lazo cerrado controlado con diseño 1:**

Se realizó la simulación para el sistema lineal en lazo cerrado utilizando MATLAB y para el sistema no lineal utilizando SIMULINK. La entrada del sistema en ambos casos fue un incremento en la tensión de excitación del 10%. Los resultados se observan en las figuras 5 a 7 para el sistema lineal y 8 a 10 para el caso no lineal.

Los tiempos de establecimiento y las oscilaciones tanto en tensión como en frecuencia son mucho menores que en lazo abierto. Esto lleva a una mejora en el comportamiento del sistema de potencia porque las oscilaciones de potencia activa y reactiva en las líneas son menores. Con esto se evita que las protecciones del sistema de potencia operen ante cambios en las consignas de las máquinas generadoras; así mismo, se evitan fluctuaciones grandes en tensión y frecuencia que afectan las cargas del sistema.

Sin embargo el esfuerzo de control para el caso no lineal es muy grande; esto implica altas cantidades de energía que deben manejar los sistemas de excitación de los generadores elevando su costo.

El esfuerzo de control en el sistema lineal alcanza valores más altos al incrementarse la potencia activa del punto de operación. Lo mismo sucede con la simulación no lineal. En todos los casos el sistema es estable aunque cambie el punto de operación, lo cual le otorga robustez al controlador diseñado.

### **Simulación del generador en lazo cerrado controlado con diseño 2:**

Se realizó la simulación para el sistema lineal en lazo cerrado utilizando MATLAB y para el sistema no

lineal utilizando SIMULINK. La entrada del sistema en ambos casos fue un incremento en la tensión de excitación del 10%. Los resultados se observan en las figuras 11 a 13 para el sistema lineal y 14 a 16 para el caso no lineal.

Este nuevo controlador ofrece las mismas ventajas respecto al sistema de potencia como el controlador del diseño 1. El comportamiento del esfuerzo de control es similar que en el caso del diseño 1, es decir, éste aumenta al incrementar la potencia del punto de operación.

Al comparar los esfuerzos de control para ambos diseños, en sus correspondientes valores de potencia activa, se observa que siempre son menores los obtenidos con el diseño 2. Esto implica menores cantidades de energía y costos para operar los generadores. Por lo tanto se logra una respuesta transiente similar en los dos casos, pero con un menor esfuerzo de control en el caso 2.

La robustez de los controladores se asegura por un buen comportamiento del sistema ante la presencia de incertidumbres. En este trabajo, se observa que el sistema sigue siendo estable aunque cambie el punto de operación para el cual los controladores fueron diseñados. Es decir, el sistema continúa manteniendo las especificaciones en presencia de cambios en las condiciones iniciales del sistema.

## **CONCLUSIONES.**

Se logró una importante simplificación en la manipulación de ecuaciones para obtener la simulación de la máquina síncrona, con ayuda de las herramientas computacionales MATLAB Y SIMULINK. Así mismo se simplifica el trabajo de diseño de controladores con comandos especializados que ofrecen estos programas.

Basados en la comparación de las figuras obtenidas, es evidente una mejor respuesta en el tiempo para las variables en la simulación con el modelo lineal. Sin embargo dichos controladores aplicados al

modelo no lineal arrojan resultados con respuestas estables.

La robustez de los controladores diseñados se observa cuando se hace la simulación del sistema con varios valores de potencia activa. Como resultado de esto se observó que el sistema sigue siendo estable.

El método de diseño basado en la ecuación matricial de Riccati demostró mejores resultados que el propuesto en [7]. El método de [7] no exige conocer las matrices de peso  $Q$  y  $R$ , lo cual simplifica su utilización, a diferencia de Riccati. Sin embargo las matrices  $Q$  y  $R$  se pueden encontrar realizando varias simulaciones, hasta obtener resultados con buenas características en la respuesta transiente.

### ANEXO DE GRÁFICAS

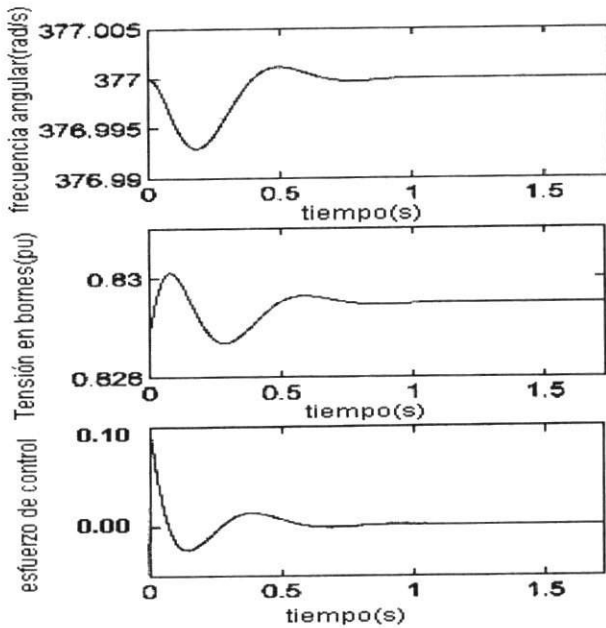


Figura 5. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=0.9$

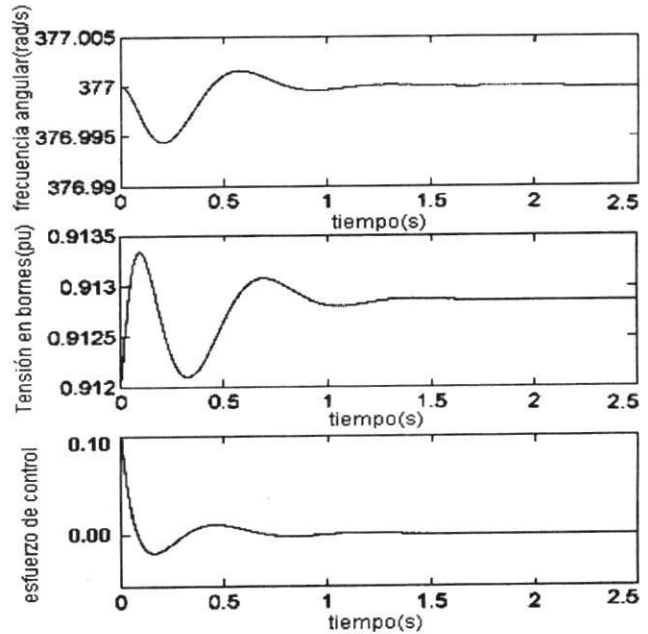


Figura 6. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=0.5$

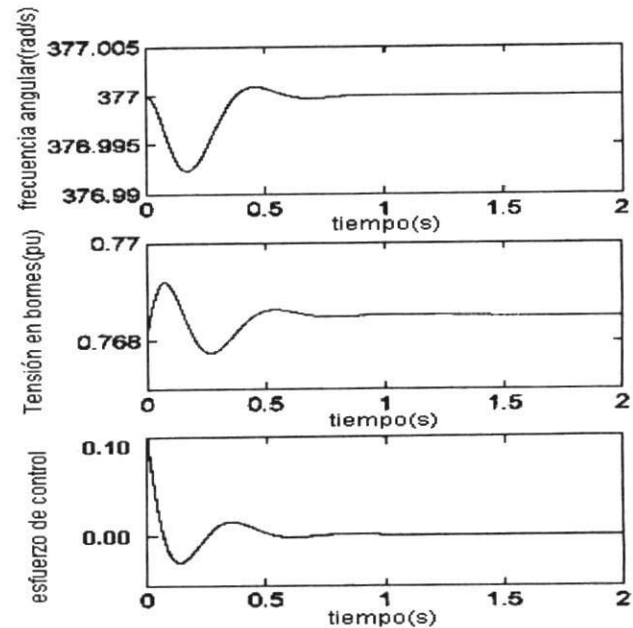


Figura 7. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=1.2$



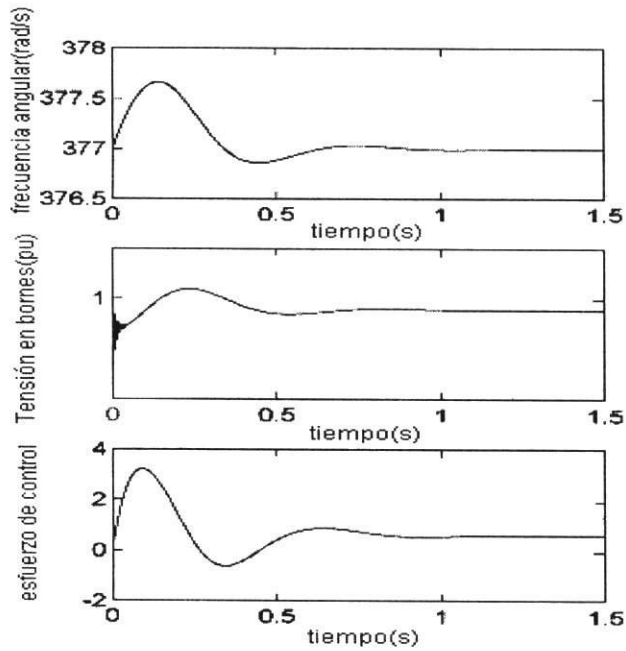


Figura 8. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=0.9$

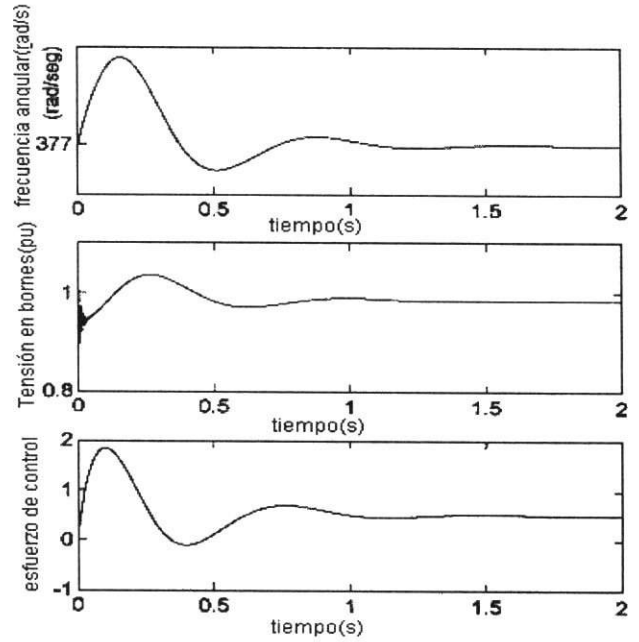


Figura 9. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=0.5$

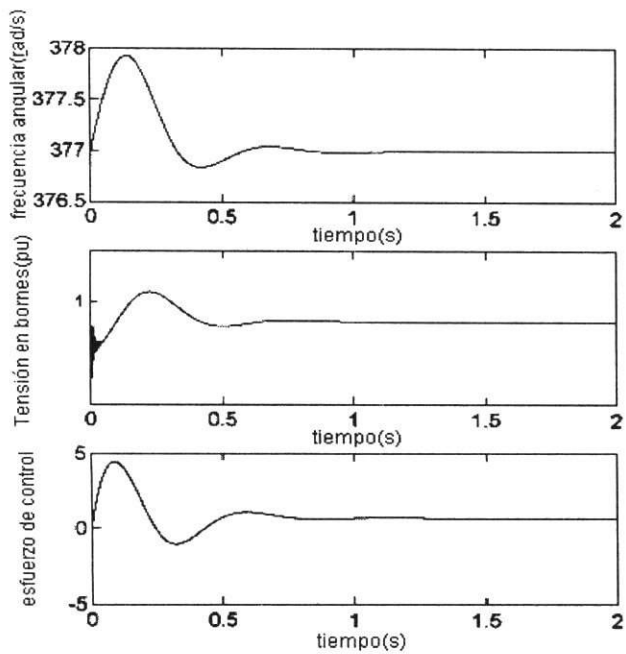


Figura 10. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 1,  $P=1.2$

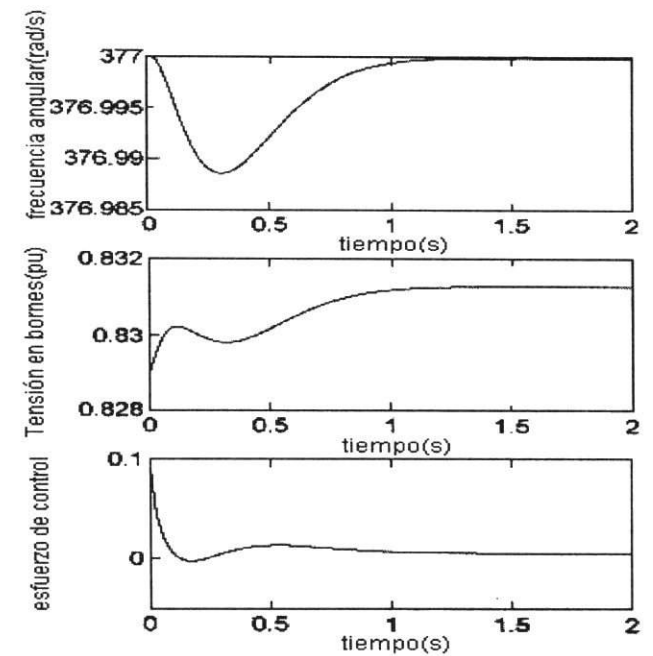


Figura 11. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=0.9$

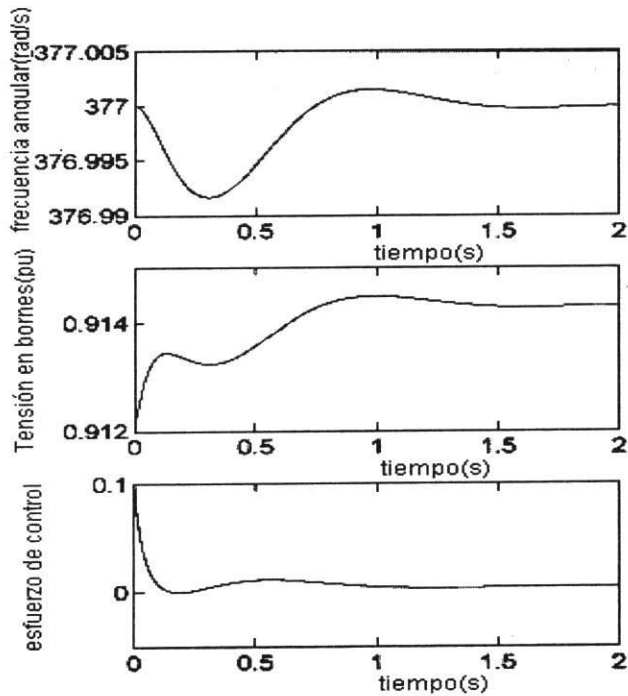


Figura 12. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=0.5$

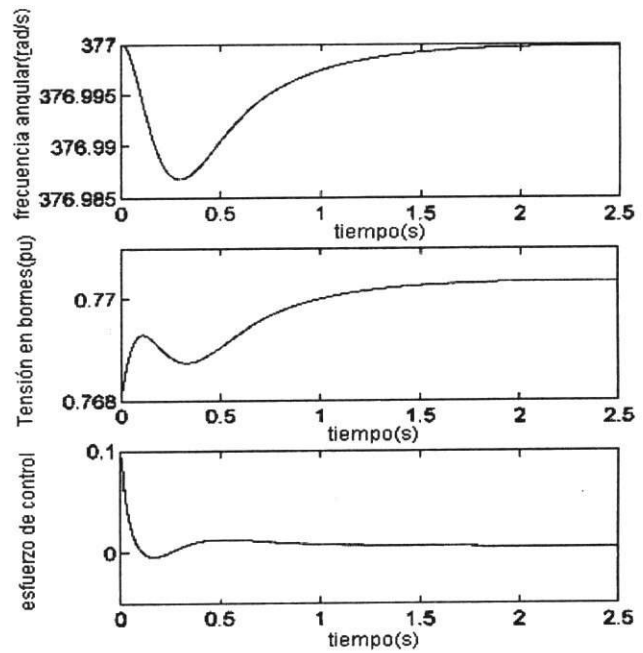


Figura 13. Sistema lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=1.2$

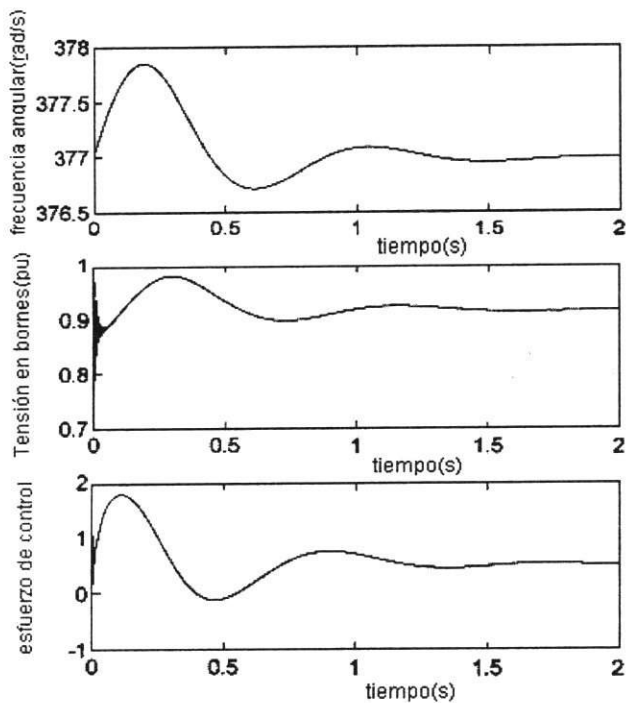


Figura 14. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=0.9$

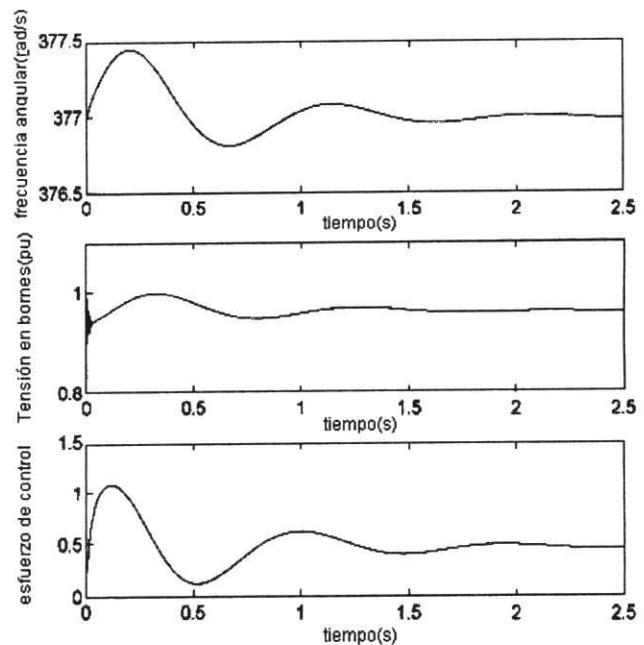


Figura 15. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=0.5$

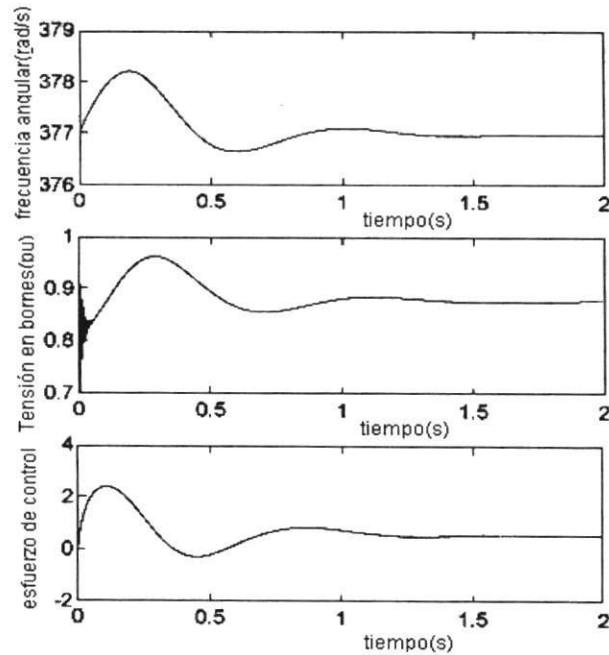


Figura 16. Sistema no lineal en lazo cerrado, diseño 2,  $P=1.2$

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. KIMBARK, E. W. *Power system stability*. New York. Wiley. 1948.
- [2]. HINDMARSH, J. *Máquinas eléctricas y sus aplicaciones*. Bilbao. Urmo. 1974.
- [3]. CONCORDIA, C. *Synchronous machines*. New York. Wiley. 1951.
- [4]. KRAUSE, P. C. *Analysis of electric machinery*. New York. Mc Graw-Hill. 1986.
- [5]. ANDERSON, P. C. y FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. Iowa. The Iowa state university press. 1977.
- [6]. ADKINS, B. y HARLEY, R. G. *The general theory of alternating current machines*, Chapman & Hall, London, 1975.
- [7]. HABIBULLAH, B. and YU, Y. «Physically realizable wide power range optimal controllers for power systems», En: *IEEE Trans. on PAS*. Sep./Oct. 1974. pp 1498-1506.
- [8]. ROHRS, C. E., MELSA, J. L. y SCHULTZ, D. G. *Sistemas de control lineal*. México . Mc Graw-Hill. 1994.
- [9]. OGATA, K. *Ingeniería de control moderna*. Prentice-Hall. 1982.
- [10]. Yu, Y. *Electric Power system dynamics*. New York . Academic press. 1983.

- [11]. RAMAMOORTY, M. and ARUMUGAM, M. «Design of optimal regulators for synchronous machines». En: *IEEE trans on PAS*. Feb 1973. pp 269-277.
- [12]. ALVAREZ, L, OSORIO M. «Determinación de los parámetros para modelar la máquina sincrónica», En: *Proyecto de grado*. Medellín. Universidad de Antioquia (Facultad de Ingeniería). 1991.
- [13]. SHAIAN, B and HASSUL, M. *Control system design using Matlab*. New Jersey. Prentice Hall. 1993.
- [14]. BOTERO C, Hector A. «Diseño y simulación de un control de tensión para un generador sincrónico», En: *Proyecto de grado*, Medellín. Universidad de Antioquia (Facultad de Ingeniería). 1995.
- [15]. The MATH WORKS Inc. *The Student Edition of SIMULINK*. New Jersey. Prentice Hall. 1996.