

# **Construcción de un Sistema de Control de Frecuencia-Voltaje para un Sistema de Generación Eléctrica a Escala para el Laboratorio de Control Automático**

Jimmy Anchundia, Juan del Pozo  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y computación  
Escuela Superior Politecnica del Litoral (ESPOL)  
Campus "Gustavo GalindoV," Km 30.5, Via perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
jjanchundia@gmail.com, jdelpozo@espol.edu.ec

## **Resumen**

*El presente trabajo consiste en construir un banco de prueba que modela una central de generación eléctrica, donde se analiza la problemática del control de la frecuencia y del voltaje generado. El sistema se caracteriza por ser un sistema multivariable con dos variables de entrada, dos variables de salida y una tercera variable de entrada que representa la perturbación del sistema. La siguiente parte consiste en realizar el control del sistema basado en las especificaciones de funcionamiento planteadas, utilizando como estrategia de control, el control por variables de estado por el método de reubicación de polos del modelo interno. Previo al control del sistema se implementan técnicas de control, como el diseño del desacoplador que es aplicada a los sistemas multivariables y el diseño del observador para estimar los estados internos del sistema que no son medidos, utilizando en todos los diseños la herramienta Simulink de Matlab. La última parte es la elaboración de manuales de práctica experimentales para el laboratorio de control automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y computación de la ESPOL. Con el objetivo que este trabajo pueda ser utilizado para implementar la técnicas de control desarrollada para los sistemas multivariables y también para modelar el comportamiento de los diferentes tipos de centrales de generación eléctrica y analizar el control de la frecuencia y del voltaje del sistema.*

**Palabras claves:** Control carga frecuencia (LFC), control regulador de voltaje (AVR), Control multientrada-multisalida (MIMO).

## **Abstract**

*The present work is to construct a test that models an electrical generation plant, which discusses the problem of controlling the frequency and voltage generated. The system is characterized by a multivariable system with two input variables and two output variables third input variable representing the perturbation of the system. The next part is to make the control system based on performance specifications raised, using as control strategy, the control state variables by the method of relocation of poles of the model. Prior to the system control, control techniques are implemented, such as the design of the coupler is applied to Multivariate systems and observer design to estimate the internal states of the system that are not measured in all designs using the Matlab Simulink tool. The last part is the development of experimental practice manuals for the automatic control laboratory of the Faculty of Electrical Engineering and Computing of the Repository. In order that this work can be used to implement control techniques developed for multivariable systems and for modeling the behavior of different types of power plants and analyze the frequency control and system voltage.*

**Keywords:** load frequency control (LFC), voltage regulator control (AVR), multi-input multi-output control (MIMO).

## 1. Introducción

En las centrales de generación eléctrica es de vital importancia realizar dos tipos de control. El primero es el control automático de generación AVC, que consiste en realizar el control carga frecuencia LFC, que mantiene la frecuencia del sistema en los valores programados, y el despacho económico. El segundo es el control AVR conocido como control regulador de voltaje, con la finalidad de mantener la magnitud del voltaje del sistema a un nivel específico. En lo mencionado anteriormente se puede visualizar la importancia que tienen ambos tipos de control en los sistemas de potencia.

Para realizar el control LFC y AVR del sistema, se implementa como técnica de control, el control por variables de estados, por el método de reubicación de polos del modelo interno. Además se utiliza otras técnicas de control, como el desacoplamiento de las variables de interés y el desarrollo de observadores para estimar los estados del sistema que no son medibles.

## 2. Elementos del banco de prueba.

- Motor de inducción trifásico que representa la turbina.
- Variador de frecuencia monofásico-trifásico, que representa la válvula principal.
- Alternador de automóvil, que representa el generador síncrono.
- Circuito de alimentación de campo, que representa al excitador.
- Resistencias fijas conectadas en paralelo, con un Variac trifásico controlado por un motor de paso, para representar la carga del sistema.
- Encoder incremental que representa el sensor de velocidad.

## 3. Modelo matemático del sistema

El motor de inducción que representa la turbina está controlado por medio de un variador de frecuencia, esto nos ayuda a simplificar la representación del motor de inducción debido a que se comporta aproximadamente como un motor DC controlado por campo [1], por otro lado el alternador en si es un generador síncrono, donde el campo del generador está representado por el rotor y su armadura por el estator, sucede lo contrario con el generador DC donde la representación de campo y armadura esta invertida en comparación con el generador síncrono, despreciando esta diferencia y asumiendo despreciable la reactancia síncrona  $x_s$  el modelo matemático de un motor síncrono y un motor DC es idéntico, por tal motivo al generador síncrono del sistema frecuencia-

voltaje se lo va a modelar como si este fuera un generador DC [8].

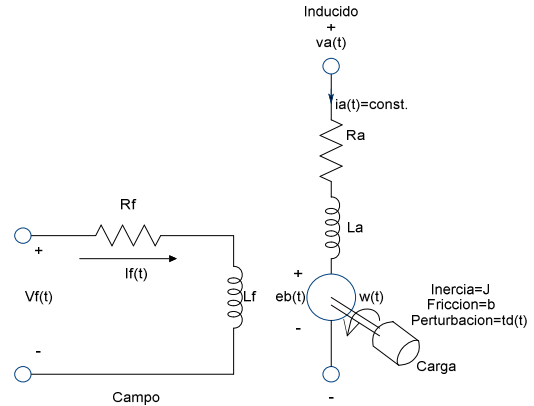


Figura 1. Circuito equivalente del motor de corriente continua.

Las ecuaciones del circuito equivalente del motor DC son las siguientes:

$$v_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt}$$

$$T_m(t) = K_f i_f(t)$$

$$\frac{L_f}{R_f} \frac{dT_m}{dt} + T_m(t) = \frac{K_f}{R_f} v_f(t)$$

$$T_m(t) - T_d(t) = T_L(t)$$

$$T_d(t) = K_d R_L(t)$$

$$T_L(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t)$$

$$\frac{J}{b} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{b} (T_m(t) - K_d R_L(t))$$

$$f(t) = K_1 \omega(t)$$

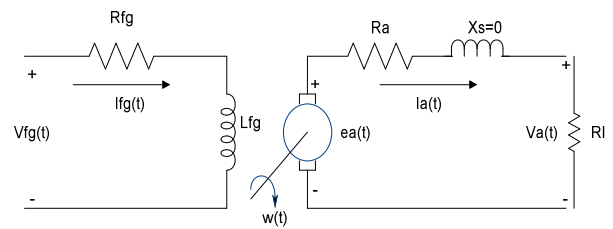


Figura 2. Circuito equivalente del generador DC.

Las ecuaciones del circuito del generador DC son:

$$\frac{L_{fg}}{R_{fg}} \frac{di_{fg}(t)}{dt} + i_{fg}(t) = \frac{1}{R_{fg}} v_{fg}(t)$$

$$e_a(t) = f(\varphi, \omega); e_a = K_\varphi \varphi(t) + K_\omega \omega(t)$$

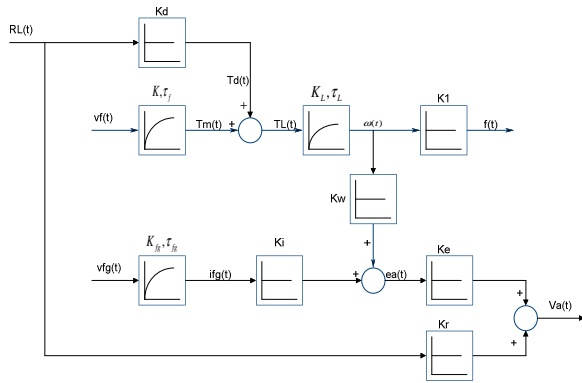
$$\varphi(t) = K_{fg} i_{fg}(t)$$

$$e_a(t) = K_i i_{fg}(t) + K_\omega \omega(t)$$

$$v_a(t) = \frac{R_L}{R_a + R_L} e_a(t); v_a(t) = K_e e_a(t) + k_r R_L;$$

$$K_e = \left. \frac{dv_a}{de_a} \right|_{R_L = \text{const}} = \frac{R_L}{R_a + R_L}; K_R = \left. \frac{dv_a}{dR_L} \right|_{e_a = \text{const}} = \frac{R_a}{(R_a + R_L)^2}$$

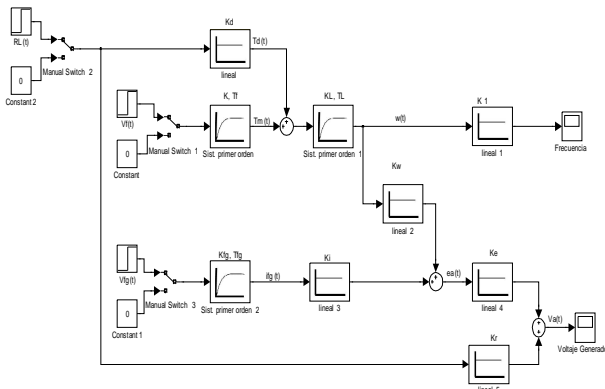
Representando las ecuaciones en forma gráfica, se obtiene el diagrama funcional del sistema.



**Figura 3.** Diagrama funcional del sistema frecuencia voltaje.

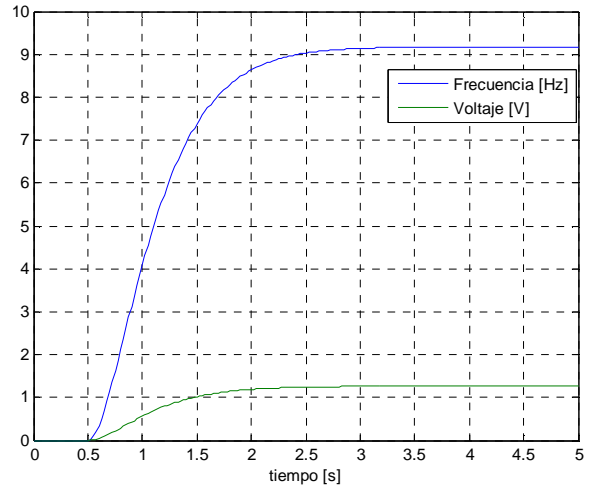
En el diagrama funcional se definen las variables de entrada,  $V_f$  que representa el voltaje de entrada al variador de frecuencia,  $V_{fg}$  que representa el voltaje de campo del alternador y la señal de perturbación  $R_L$ . Las variables de salida  $f$  que representa la frecuencia del sistema y  $V_a$  que representa el voltaje de salida del sistema.

Para determinar la dinámica del sistema se simula el sistema en el Simulink de Matlab [15].



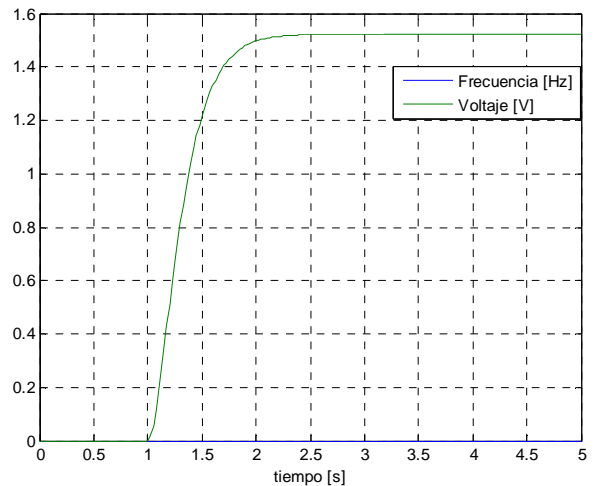
**Figura 4.** Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje en Simulink.

La primera prueba consiste en variar el voltaje del variador de frecuencia  $v_f(t)$  manteniendo constante el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  y la carga  $R_L(t)$ .



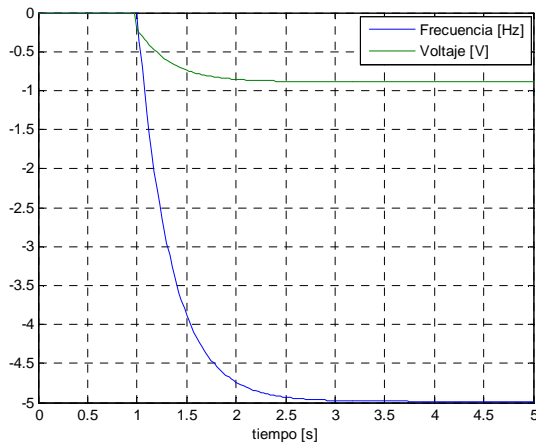
**Figura 5.** Respuesta de la Frecuencia y del voltaje generados al variar el voltaje del variador de frecuencia.

La segunda prueba consiste en variar el voltaje de campo del alternador  $V_{fg}(t)$  manteniendo constante el voltaje del variador de frecuencia  $V_f(t)$  el y la carga  $R_L(t)$ .



**Figura 6.** Respuesta de la frecuencia y voltaje generado al variar el voltaje de campo del alternador.

La tercera prueba consiste en variar la carga  $R_L(t)$  manteniendo constante el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  y el voltaje del variador de frecuencia  $v_f(t)$ .



**Figura 7.** Respuesta de la frecuencia y voltaje generado al realizar variación en la carga.

Por medio de este análisis podemos concluir que:

- Las variables de frecuencia y voltaje de salida son directamente proporcionales al voltaje de campo del motor que representa al voltaje de entrada al variador de frecuencia.
- La variable de voltaje generado es directamente proporcional al voltaje de campo del alternador.
- Las variables de frecuencia y voltaje de salida son inversamente proporcional a la variación positiva de la carga del sistema.

#### 4. Funciones de transferencia del sistema

Para determinar las funciones de transferencia del sistema, el toolbox de system identification (IDENT) de Matlab permite construir de forma exacta modelos simplificados de sistemas complejos. Proporciona las herramientas para crear los modelos matemáticos de los sistemas dinámicos basados en datos observados en la entrada-salida del sistema.

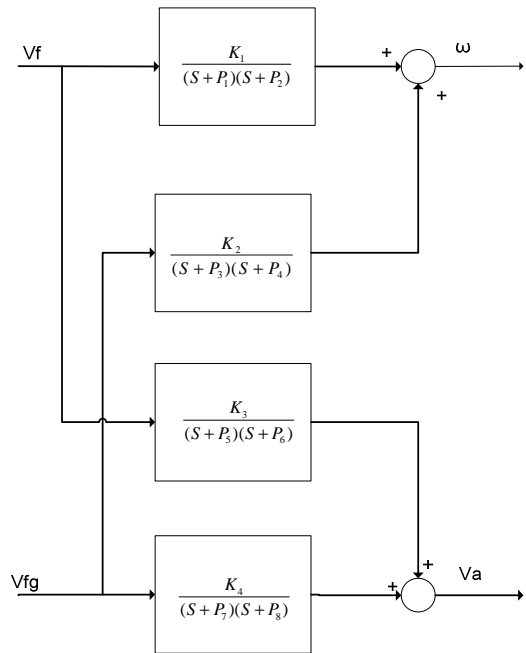
$$G_{11} = \frac{\omega}{V_f} = \frac{1673.2553}{(s + 3.035)(s + 3.008)}$$

$$G_{12} = \frac{\omega}{V_{fg}} = \frac{-314.7891}{(s + 4.066)(s + 3.069)}$$

$$G_{21} = \frac{V_a}{V_f} = \frac{18.7866}{(s + 4.237)(s + 3.515)}$$

$$G_{22} = \frac{V_a}{V_{fg}} = \frac{54.4212}{(s + 5.976)(s + 5.975)}$$

Por medio de las funciones de transferencia se puede representar al sistema frecuencia-voltaje [6].



**Figura 8.** Representación del sistema frecuencia-voltaje.

#### 5. Desacoplamiento del sistema frecuencia-voltaje.

En la figura 5, 6 y 7 se muestra que existe un grado de acoplamiento entre las variables de entradas y las variables de salida. La matriz de ganancias relativas indica el grado de interacción existente entre las variables y permite determinar con que variable de entrada se realiza el control de la frecuencia y el voltaje generado [5].

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix}$$

Los elementos de la matriz de ganancias relativas depende de la ganancia de estado estacionario de las funciones de transferencias identificadas.

$$\mu_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{12} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\mu_{21} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{22} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

Reemplazando:

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix}$$

Los pares de las variables que están interrelacionadas son:  $\mu_{11}$  que relaciona Vf con  $\omega$  y  $\mu_{22}$  que relaciona Vf<sub>g</sub> con Va.

### 5.1. Diseño del desacoplador

El objetivo es que el sistema frecuencia-voltaje se divida en dos sistemas totalmente independientes, el sistema frecuencia y el sistema voltaje de salida. El compensador que realiza la tarea de desacoplamiento, se conoce con el nombre de desacoplador [6].

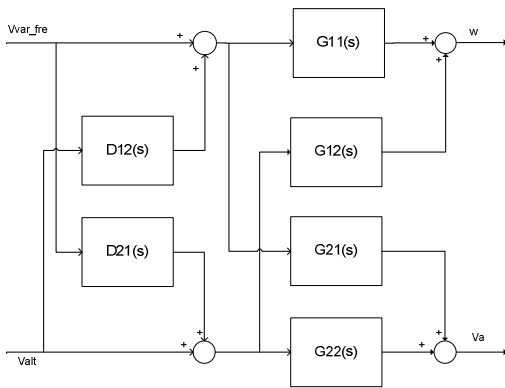


Figura 9. Diagrama de bloques del desacoplador.

Se pretende que D12 cancele el efecto que se produce en  $\omega$  cuando se produce un cambio en Valt (Vfg) y que D21 cancele el efecto que se produce en Va cuando se produce un cambio en Vvar\_fre (Vf).

$$\frac{\omega(s)}{v_{alt}(s)} = D_{12}(s)G_{11}(s) + G_{12}(s) = 0$$

$$\frac{v_a(s)}{v_{var\_fre}} = D_{21}(s)G_{22}(s) + G_{21}(s) = 0$$

Por lo tanto:

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{0.1878(s+3)(s+3.035)}{(s+4.066)(s+3.069)}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = -\frac{0.3452(s+5.976)(s+5.975)}{(s+4.237)(s+3.515)}$$

Para demostrar que el desacoplador realiza su función, se realiza una simulación en el Simulink de Matlab.

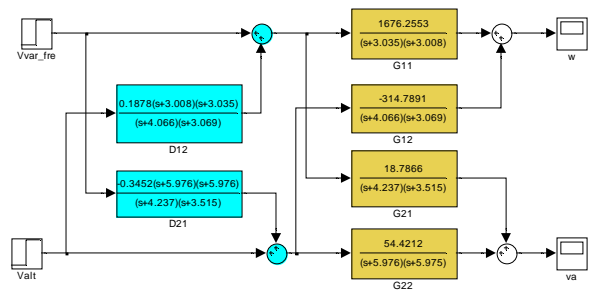


Figura 10. Simulación del sistema frecuencia-voltaje desacoplado

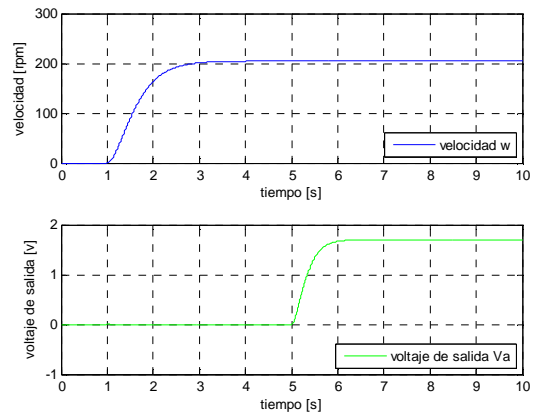


Figura 11. Resultado de la simulación del sistema desacoplado.

### 6. Controlador por el método de reubicación de polos del modelo interno.

Se desea implementar un compensador que garantice que las salidas realicen el seguimiento de la señal de referencia o de perturbación con error cero. A tal compensador se lo conoce con el nombre del modelo interno [2].

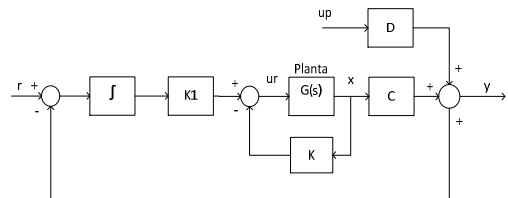


Figura 12. Diagrama del modelo interno

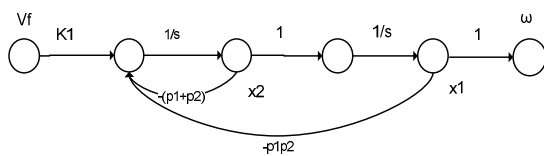
## 6.1. Diseño del controlador

Se diseña el controlador para el sistema frecuencia y el controlador para el sistema voltaje de salida.

## 6.2 Diseño del controlador para el sistema frecuencia.

Primero se necesita determinar la observabilidad y la controlabilidad del sistema frecuencia.

La matriz de estado para el sistema frecuencia, es obtenida de la representación de la función de transferencia  $\omega/V_f$  en diagrama de flujo de señal en la forma canónica de variable de fase [1].



**Figura 13.** Representación de la función de transferencia  $\omega/V_f$  en diagrama de flujo

Las ecuaciones de la representación en variable de flujo del sistema son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.12928 & -6.043 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1676.25 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

El hecho que la función de transferencia esta representado en la forma canónica de variable de fase, el sistema es observable.

La controlabilidad del sistema esta dado por:

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

$$P_c = \begin{bmatrix} 0 & 1676.25 \\ 1676.25 & -10130 \end{bmatrix}$$

Como el rango de  $P_c$  es dos, el sistema es controlable.

Para el control, se desea que el sistema frecuencia se comporte como un sistema de segundo orden y que posea un tiempo de estabilización de 1 segundo y un sobrenivel porcentual menor o igual al 5% .

$$\delta\omega_n = \frac{4}{1} = 4$$

$$S_p = 100e^{-\pi/\tan 45} = 4.32\%$$

En total hay que reubicar tres polos, para que exista dominancia de segundo orden, se recomienda que el tercer polo debe ser ubicado de tal manera que se encuentre alejado cinco veces la parte real de los polos dominantes [1], por lo tanto la posición de los polos es la siguiente:

$$p_{11} = [-4 - 4i \quad -4 + 4i \quad -20]$$

Las matrices de modelo interno del sistema frecuencia son las siguientes.

$$A_{mi11} = \begin{bmatrix} 0 & C_{11} \\ 0 & A_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -9.12928 & -6.043 \end{bmatrix}$$

$$B_{mi11} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1676.25 \end{bmatrix}$$

$$C_{mi11} = [1 \ 0]$$

La matriz de realimentación de estado es obtenida a través de la instrucción place de Matlab.

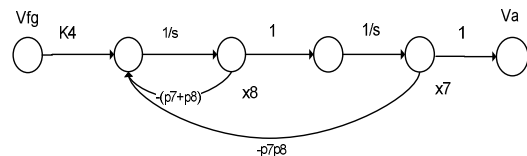
$$K_{c11} = \text{place}(A_{mi11}, B_{mi11}, p_{11})$$

El valor de la matriz  $K_{c11}$  que se obtiene del Matlab es la siguiente.

$$K_{c11} = [0.1909 \quad 12 \quad 103]$$

## 6.3 Diseño del controlador para el Sistema voltaje de salida.

La matriz de estado para el sistema frecuencia, es obtenida de la representación de la función de transferencia  $V_a/V_f$  g en diagrama de flujo de señal en la forma canónica de variable de fase.



**Figura 14.** Representación de la función de transferencia  $V_a/V_f$  en diagrama de flujo

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -35.64 & -11.94 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 54.42 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}$$

El hecho que la función de transferencia esta representado en la forma canónica de variable de fase, el sistema es observable.

La controlabilidad del sistema esta dado por:

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

$$P_c = \begin{bmatrix} 0 & 54.42 \\ 54.42 & -649.77 \end{bmatrix}$$

Como el rango de  $P_c$  es dos, el sistema es controlable.

El control del voltaje de salida se lo realiza por medios eléctricos, esto hace que responda en forma más rápida, por lo tanto se puede ser más exigente y ajustar el controlador de tal manera que posea dominancia de segundo orden con un tiempo de estabilización de 0.5 segundos y un sobrenivel menor o igual al 5%.

$$\delta\omega_n = \frac{4}{0.5} = 8$$

$$S_p = 100e^{-\pi/\text{tag}45} = 4.32\%$$

Por lo tanto:

$$p_{22} = [-8 - 8i \quad -8 + 8i \quad -40]$$

Las matrices de modelo interno del sistema voltaje de salida son las siguientes:

$$A_{mi22} = \begin{bmatrix} 0 & C_{22} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -35.64 & -11.94 \end{bmatrix}$$

$$B_{mi22} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 54.42 \end{bmatrix}$$

$$C_{mi22} = [1 \ 0]$$

La matriz de realimentación de estado es obtenida a través de la instrucción place de Matlab.

$$K_{c22} = \text{place}(A_{mi22}, B_{mi22}, p_{22})$$

El valor de la matriz  $K_{c22}$  que se obtiene del Matlab es la siguiente.

$$K_{c22} = [23.5208 \ 14.06 \ 252.3591]$$

## 7. Diseño del observador

Las variables de estado sistema frecuencia-voltaje no pueden medirse directamente. Para casos como este, las variables de estado que se desean conocer han de ser calculados a partir de la evolución de las señales conocidas del sistema, que son sus salidas y sus entradas [4].

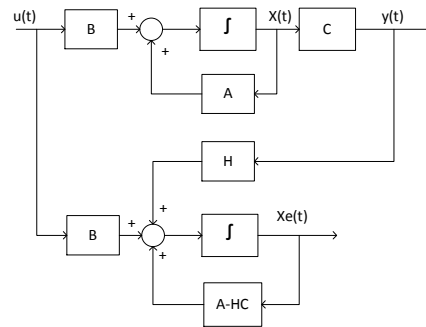


Figura 15. Esquema del sistema con observador

### 7.1. Diseño del observador para el sistema frecuencia.

Para estimar los estados del sistema frecuencia necesitamos determinar el valor de la matriz de realimentación  $H$  de la figura 15, para obtenerla utilizamos las transpuestas de las matrices  $A_{11}$  y  $C_{11}$  de la representación matricial de estados del sistema frecuencia.

$$A_{11}' = \begin{bmatrix} 0 & -9.12928 \\ 1 & -6.043 \end{bmatrix}$$

$$C_{11}' = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Se necesita que la dinámica del observador dado por  $F=A-HC$  sea más rápida que la del sistema dado por  $A$ . Una regla práctica es escoger una respuesta de observador por lo menos cuatro o cinco veces más rápida que la respuesta del sistema [4].

por lo tanto los nuevos polos del sistema observador están dados por el vector  $p_{o11}$ .

$$p_{o11} = [-12 \quad -14]$$

Con esta información se utiliza la instrucción place para determinar el valor de la matriz  $H_{11}$ .

$$H_{11} = \text{place}(A'_{11}, B'_{11}, p_{o11})$$

La matriz H de la figura 15 representada por  $H_{11}$ , que se obtiene al ejecutar esta instrucción en Matlab es la siguiente:

$$H_{11} = \begin{bmatrix} 0.0233 \\ 0.0119 \end{bmatrix}$$

Para verificar que el observador del sistema frecuencia realiza la estimación correcta de los estados, se realiza una simulación en el Simulink de Matlab.

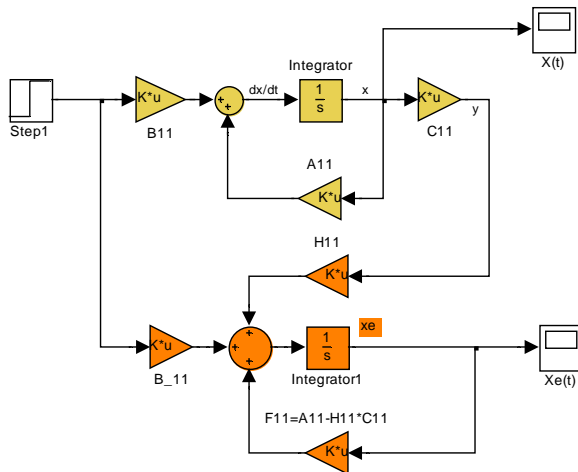


Figura 16. Simulación del observador del sistema frecuencia.

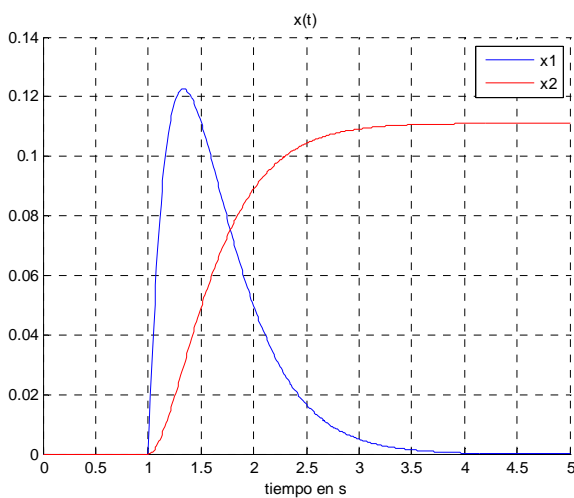


Figura 17. Estados del sistema Frecuencia.

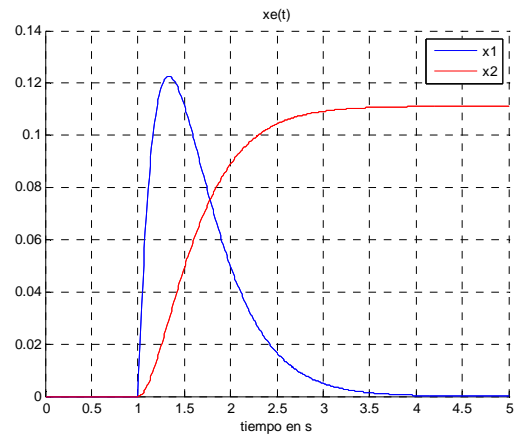


Figura 18. Estados estimados del sistema Frecuencia.

## 7.2. Diseño del observador para el sistema voltaje de salida.

las transpuestas de las matrices  $A_{22}$  y  $C_{22}$  de la representación matricial de estados del sistema voltaje de salida están dadas por:

$$A_{22}' = \begin{bmatrix} 0 & -35.64 \\ 1 & -11.94 \end{bmatrix}$$

$$C_{22}' = \begin{bmatrix} 54.42 \\ 0 \end{bmatrix}$$

por lo tanto los nuevos polos del sistema observador están dados por el vector  $p_{o22}$ .

$$p_{o22} = [-40 \quad -41]$$

Con esta información se utiliza la instrucción place para determinar el valor de la matriz  $H_{22}$ .

$$H_{22} = \text{place}(A'_{22}, B'_{22}, p_{o22})$$

La matriz H de la figura 15 representada por  $H_{22}$ , que se obtiene al ejecutar esta instrucción en Matlab es la siguiente:

$$H_{22} = \begin{bmatrix} 14.329 \\ 1.269 \end{bmatrix}$$

Para verificar que el observador del sistema voltaje de salida realiza la estimación correcta de los



estados, se realiza una simulación en el Simulink de Matlab.

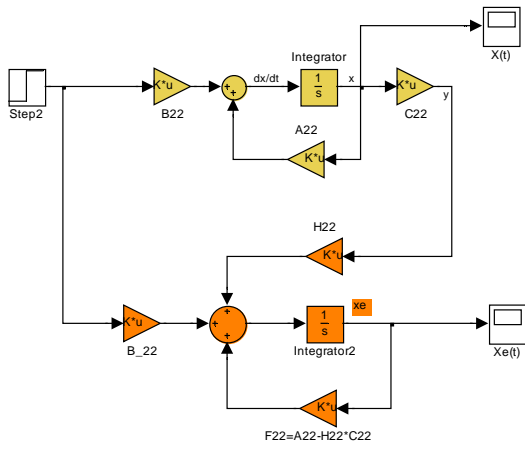


Figura 19. Simulación del observador del sistema voltaje de salida.

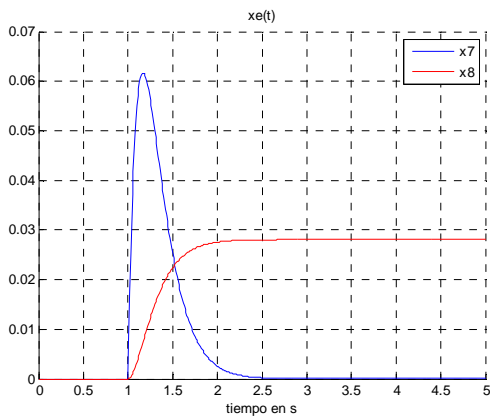


Figura 20. Estados del sistema voltaje de salida.

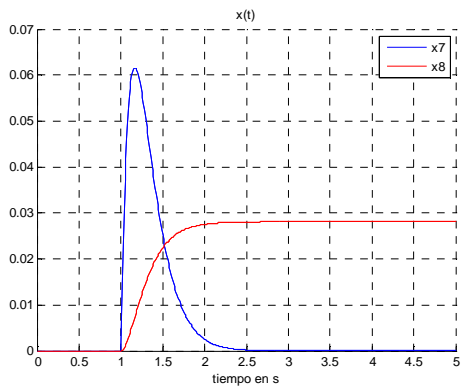


Figura 21. Estados estimados del sistema voltaje de salida.

## 8. Simulación del controlador del sistema frecuencia-voltaje

se procede a crear un modelo en SIMULINK para verificar que se cumplan las especificaciones de funcionamiento.

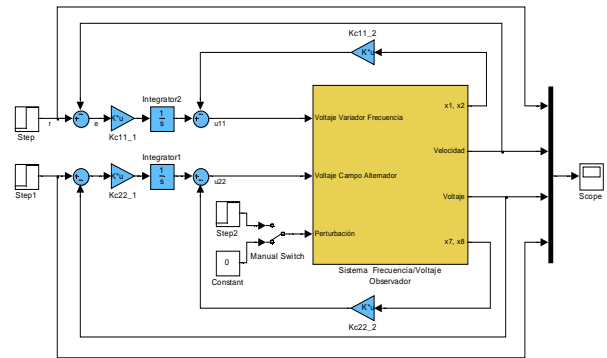


Figura 22. Modelo en Simulink del sistema frecuencia-voltaje con controlador de modelo interno.

Dentro del bloque sistema frecuencia/voltaje observador se encuentra el subsistema observador.

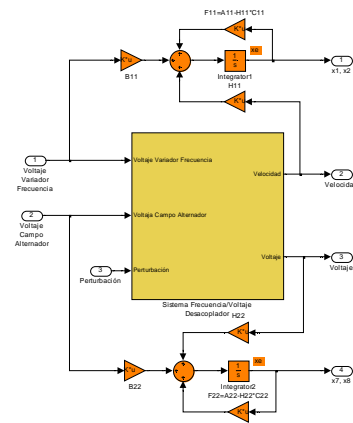


Figura 23. Subsistema observador.

Dentro del bloque sistema frecuencia/voltaje Desacoplador se encuentra el subsistema Desacoplador.

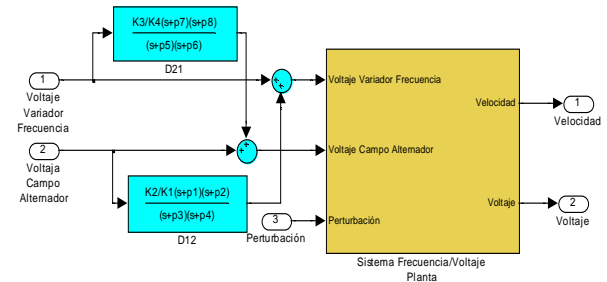


Figura 24. Subsistema Desacoplador

Dentro del bloque sistema frecuencia/voltaje planta se encuentra el subsistema planta. Donde se encuentran las funciones de transferencias identificadas del sistema, expresadas en variables de estado.

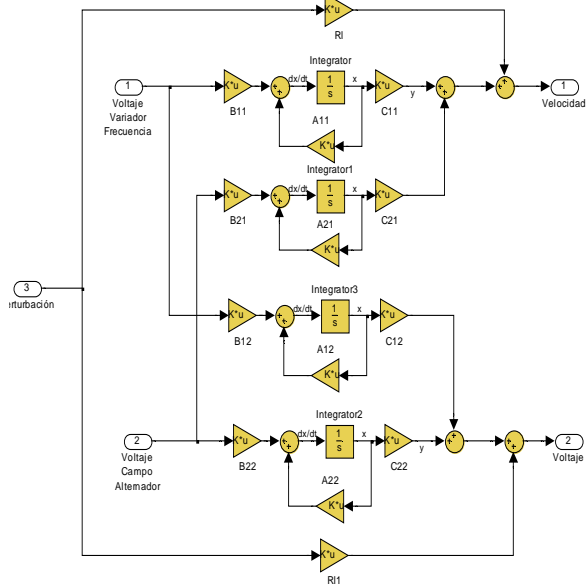


Figura 25. Subsistema Planta

En la figura 26 se muestra el resultado de la simulación del sistema controlado.

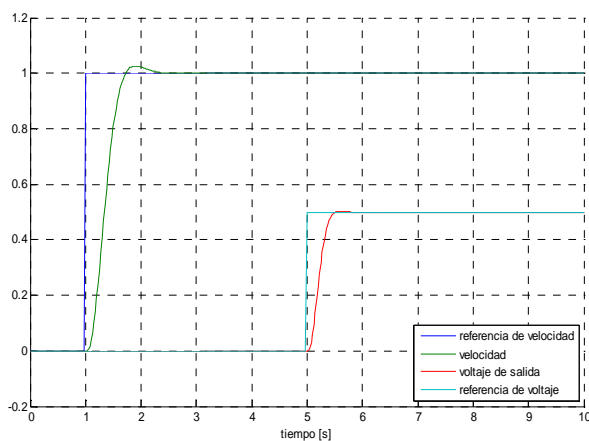


Figura 26. Resultado de la simulación del sistema controlado

La respuesta del sistema, cuando este es perturbado, se muestra en la figura 27.

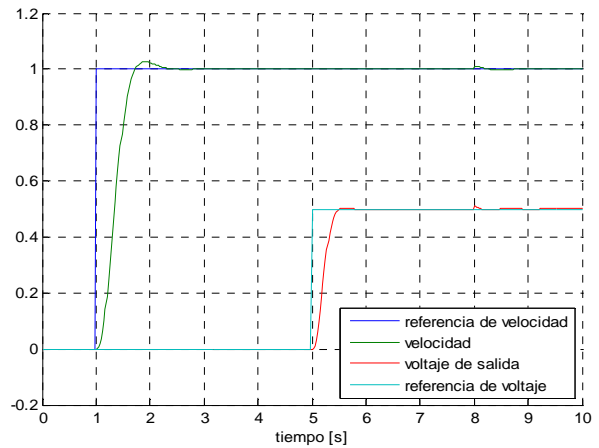


Figura 27. Respuesta del sistema perturbado a los ocho segundos de la simulación.

## 9. Prueba y ajuste fino del controlador en el banco de prueba.

Para implementar el control en el banco de prueba se realiza un modelo en el Simulink de Matlab, parecido al utilizado en la Simulación.

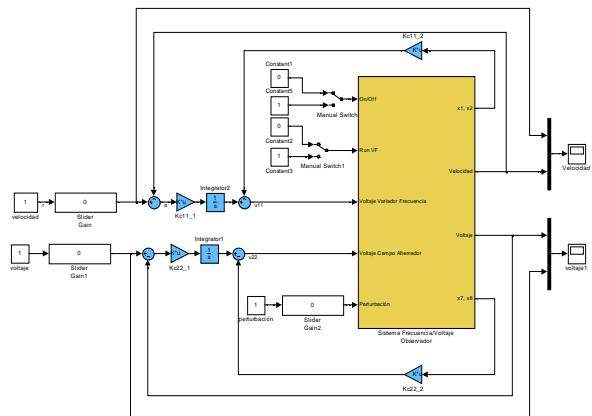


Figura 28. Modelo en Simulink para el control del sistema real.

Los subsistemas observador y desacoplador son los mostrados en la figura 23 y 24 respectivamente. La diferencia se muestra en el subsistema planta, donde se encuentran los bloques del toolbox OPC, que permiten realizar el envío y adquisición de señales del banco de prueba por medio del equipo de campo COMPACT FIELDPOINT cFP.

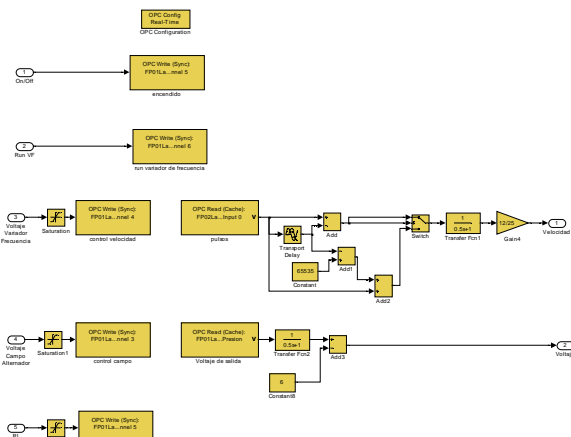


Figura 29. Subsistema planta del banco de prueba.

Para el control del sistema se realizaron ciertos ajustes en la matriz de realimentación de estados como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Ajuste de la matriz de realimentación de estados.

$K_{c11_1}$	0.04
$K_{c11_2}$	[25 102]
$K_{c22_1}$	12
$K_{c22_2}$	[18 254]

La respuesta del sistema ante un cambio en la señal de referencia de la velocidad se muestra en la figura 30.

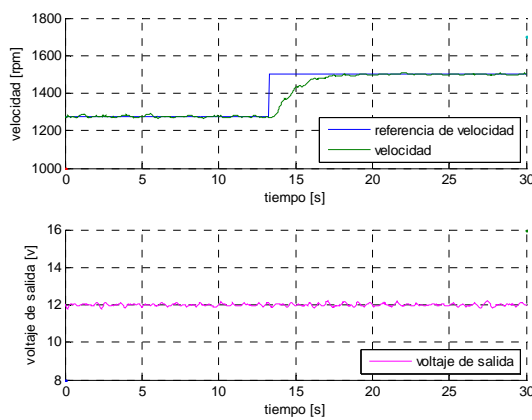


Figura 30. Respuesta al escalón del sistema frecuencia.

La respuesta del sistema ante un cambio en la señal de referencia del voltaje de salida se muestra en la figura 31.

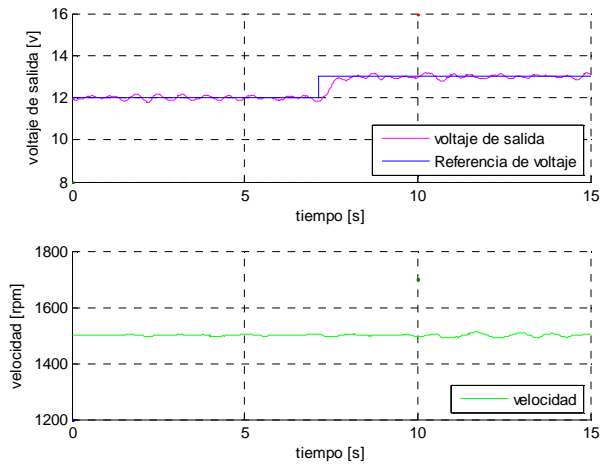


Figura 31. Respuesta al escalón del sistema voltaje de salida.

La respuesta del sistema cuando este es perturbado, se muestra en la figura 32. En esta prueba el consumo de energía varía de 64 [W] a 161 W. Se puede observar que la velocidad y el voltaje se mantiene con error de estado estacionario cero, también que el efecto de la perturbación no se aprecia en la señal de velocidad y de voltaje, debido que el control realiza los ajustes más rápido que la variación de la carga. Pero si se puede apreciar el efecto que produce la variación de la carga en el voltaje de entrada al variador de frecuencia y el voltaje de campo del alternador, que son las señales que realizan las medidas correctivas para controlar el sistema.

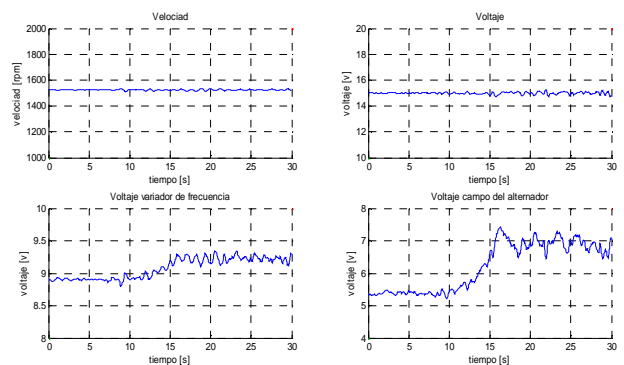


Figura 32. Prueba del sistema perturbado.



**Figura 33.** Banco de prueba del sistema frecuencia-voltaje.

## 10. Conclusiones

El diseño de la estructura del sistema, cumplió con las expectativas expuesta en la etapa de diseño, que fueron pensadas en base a estandarizar los equipos existentes en el laboratorio de control automático y además que sean robustos.

El modelo matemático que se obtuvo al representar el motor como un motor DC y al alternador como un generador DC da una buena aproximación del comportamiento dinámico del sistema frecuencia-voltaje.

El ajuste del controlador realizado en la planta real genera un aumento en el tiempo de estabilización y una disminución del sobrenivel porcentual del sistema frecuencia, lo importante es que el comportamiento dinámico del sistema se mantiene dentro del rango de las especificaciones de funcionamiento.

El sistema frecuencia-voltaje puede realizar el control frente a cambios referencia (servo control) y también el control frente a variaciones de carga o perturbación (control regulador). En las entrales de generación interesa mantener el nivel de tensión y la frecuencia del sistema constante ante cualquier variación de carga (control regulador).

## 11. Recomendaciones

El modelo en Simulink usado para controlar el sistema frecuencia-voltaje es operado de tal manera que el valor de referencia o set-point inicial para

ambos es cero. El sistema es llevado de a poco a sus niveles nominales de operación.

El algoritmo o modelo en Simulink usado para convertir los pulsos contados por el cFP ctr-502 en velocidad tiene muchos procesos. Es importante optimizar este algoritmo de tal manera que no afecte la medición en tiempo real de las variables velocidad y voltaje.

Previo al diseño del controlador se desacoplo el sistema obteniendo dos sistemas totalmente independientes para luego diseñar un controlador para cada uno. Sería importante analizar el sistema completo y diseñar un controlador por el método de reubicación de polos del modelo interno sin desacoplar el sistema frecuencia-voltaje.

## 12. Referencias

- [1] Dorf, Richard; Bishop, Robert, Sistemas de Control Moderno, Pearson Prentice Hall – Madrid 2005.
- [2] Sergio Domínguez, Pascual Campoy, José María Sebastián, Agustín Jiménez, Control en el espacio de estados, Prentice hall, 2006
- [3] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de control moderna, Prentice hall, 2010
- [4] Katsuhiko Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, Prentice hall, 1996, pág 444.
- [5] Abel, D.; Bolling, A. – Rapid Control Prototyping, Methoden und Anwendungen – Springer – Berlín 2006.
- [6] Maestría en automatización y control industrial (MACI), Interacción en sistemas multivariables, fecha de consulta Enero del 2013.
- [7] Smith Carlos, Corripio Armando, Multivariable process control, Noriega Limusa, 1991.
- [8] María Antonieta Alvarez, Jose Luis Gonzales, “Diseño e implementación de un sistema de control de frecuencia y voltaje utilizando Matlab”, informe de trabajo de graduación, Facultad de ingeniería en electricidad y computación, Escuela Superior Politécnica del litoral, 2005
- [9] Chapman Stephen J., máquinas eléctricas, Mc Graw Hill, 2005
- [10] Liwschitz Michael, Whipple Clyde, máquinas de corriente alterna, C. E. C. S. A, México 1974
- [11] B.M. Weedy, electric power systems, John Wiley & Sons, 1975
- [12] Albert Moser, Power systems II, institute fur elektrische anlagen und energiewirtschaft, fecha de consulta Junio del 2013.
- [13] Schneider Electric guía de programación ATV-302, [http://download.schneiderelectric.com/files?p\\_File](http://download.schneiderelectric.com/files?p_File)

- [e\\_Id=27535390&p\\_File\\_Name=ATV312\\_programming\\_manual\\_SP\\_BBV46387\\_02.pdf](#), fecha de consulta Diciembre del 2011.
- [14] Siemens, manual de motores trifásicos de inducción,  
[http://prof.usb.ve/jaller/Guia\\_Maq\\_pdf/cat\\_motores\\_ind.pdf](http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/cat_motores_ind.pdf), fecha de consulta diciembre del 2011
- [15] Kuebler, Rotary measuring technology,  
[http://www.kuebler.com/PDFs/archiv/.../5810\\_en.pdf](http://www.kuebler.com/PDFs/archiv/.../5810_en.pdf), fecha de consulta diciembre del 2011.
- [16] Del Pozo Juan, prácticas del lab. De control automático,  
<http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>, fecha de consulta febrero del 2013.
- [17] Cenace, sistemas de regulación de velocidad,  
<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/32/Regulaci%C3%B3nVelocidad%201.pdf>, fecha de consulta Junio del 2013

