

Diego A. Mejía Giraldo, Ricardo Andrés Bolaños O., Carlos Adrián Correa F.  
Técnicas de control adaptativas aplicadas a sistemas multivariados (M.I.M.O.)  
*Scientia Et Technica*, vol. XIII, núm. 35, agosto, 2007, pp. 37-42,  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903508>



*Scientia Et Technica*,  
ISSN (Versión impresa): 0122-1701  
scientia@utp.edu.co  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Colombia

## TÉCNICAS DE CONTROL ADAPTATIVAS APLICADAS A SISTEMAS MULTIVARIABLES (M.I.M.O.)

### Adaptive control techniques implemented for multivariable systems (M.I.M.O.)

#### RESUMEN

En este artículo muestra un control PID y por Reubicación de Polos que son implementados adaptativamente, mediante la incorporación de variantes para que el sistema pueda ser manejado desde un computador digital por medio de la adquisición de datos.

Se simula el control multivariable de frecuencia y voltaje de un generador sincrónico real de 1/3 Hp, 120 V, 1800 RPM y 4 polos. Sus parámetros fueron identificados previamente de manera adaptativa partiendo de un modelo matemático de tercer orden (esquema de identificación fuera de línea). Los resultados obtenidos muestran la eficacia de ambas estructuras de control.

**PALABRAS CLAVES:** Sistemas SISO, Sistemas MIMO, PID, Reubicación de Polos.

#### ABSTRACT

*This paper shows PID and pole placement control implemented adaptively, with variations so that it can be used in digital computers. 120V, 60Hz, 1800rpm, 4 pole synchronous generator is used for simulation of frequency and voltage multivariable control. Parameters were obtained adaptively from a mathematical 3<sup>rd</sup> order model. According to the obtained results, robustness of both control strategies is observed.*

**KEYWORDS:** *SISO Systems, MIMO Systems, PID, Pole Placement.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Algunos sistemas físicos pueden ser representados por una entrada y una salida, este es el caso de los sistemas S.I.S.O., [1], (*Single Input – Single Output*), sin embargo, existen gran cantidad de sistemas que cuentan con múltiples entradas y múltiples salidas y son denominados sistemas M.I.M.O., [1], del inglés (*Multiple Input Multiple Output*).

El desarrollo y evolución de la teoría de control, ha permitido desarrollar gran cantidad de técnicas tanto de identificación como de control adaptativas [1] que utilizan el computador digital para tal propósito. Entre las técnicas de control existentes se mencionan el tradicional controlador PID [6, 4] y control por reubicación de polos [2, 5], las cuales son usadas como caso de estudio de este artículo para el propósito de control. Como se requiere el uso del computador digital, se introducen pequeñas variantes en las técnicas, implementando para ello la transformada Z de modo que se pueda ingresar el modelo matemático de sistemas físicos multivariable [9], dentro del paquete de simulación de MatLab, para que sea posible verificar la efectividad del modelo propuesto.

El sistema de prueba es el resultado de la identificación adaptativa de un sistema físico real formado por un

pequeño generador sincrónico impulsado por un primomotor de inducción.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Sistemas S.I.S.O. de lazo cerrado

Los sistemas S.I.S.O. son aquellos que cuentan simplemente con una entrada y una única salida, de esta manera es lógico pensar que para mantener la salida deseada del sistema deben hacerse los ajustes necesarios a la entrada y de esta forma se lograría el propósito de control, sin embargo, existe la necesidad de observar constantemente cómo es la respuesta ante las variaciones en la entrada, por ello surge la necesidad de cerrar el lazo de control para monitorear de manera permanente la salida del sistema y compararla con una señal de referencia o salida deseada. La Figura 1 muestra un sistema de control SISO en lazo cerrado [7].

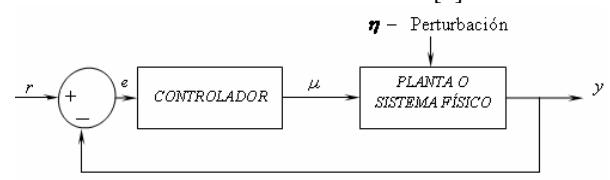


Figura 1. Sistema de Control SISO en Lazo Cerrado.

Donde:  $r$  es la referencia del sistema,  $\mu$ , es la señal de control,  $y$  es la salida del sistema, mientras que  $e = r - y$  es el error usado como entrada al controlador.

Nótese que se compara la respuesta deseada,  $r(t)$ , y la salida del sistema,  $y(t)$ , el error leído,  $e(t)$ , es llevado al controlador para generar la señal de control,  $u(t)$ , necesaria para que el sistema en lazo cerrado, Figura 1, siga la señal de referencia aún cuando es sometido a perturbaciones externas.

## 2.2 Sistemas M.I.M.O. en Lazo Abierto

Las siglas M.I.M.O. indican que un sistema posee Múltiples Entradas y Múltiples. El diagrama básico de bloques para este tipo de sistemas es el mostrado en la Figura 2.

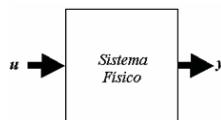


Figura 2. Esquema de un Sistema MIMO

Para el caso general de un sistema multivariable,  $u$  y  $y$  representan vectores columna de dimensiones  $m_x l$  y  $n_x l$  respectivamente. Cuando  $m = n = 2$ , se obtiene un sistema de dos entradas y dos salidas, representado por el modelo de la Figura 3.

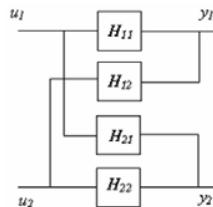


Figura 3. Sistema MIMO de 2 Entradas y 2 Salidas

Vale la pena destacar de la Figura 3 que existen términos cruzados ( $H_{12}$  y  $H_{21}$ ) entre las dos salidas y ambas entradas, como ocurre en general para los sistemas físicos reales existentes, la relación existente entre las salidas y las entradas es dada por:

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11} u_1 + H_{12} u_2 \quad (1) \\ y_2 &= H_{21} u_1 + H_{22} u_2 \end{aligned}$$

Que pueden ser representadas mediante la matriz de transferencia (2):

$$H(z) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Deben conocerse entonces las funciones de transferencia ( $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$ ,  $H_{22}$ ) que describan el comportamiento físico de la planta.

## 2.3 Control de Sistemas Físicos

Haciendo extensivo el estudio de los controladores PID, se plantea inicialmente el caso del controlador auto-sintonizado [2, 4] desde un computador digital tipo PC.

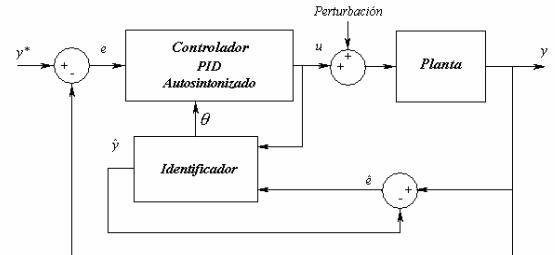
### 2.3.1 Controlador PID Autosintonizado

Entre las muchas técnicas de control existentes, la técnica tradicional PID [9] continúa siendo una de las más implementadas al nivel industrial e incluso ha incursionado en muchos otros campos, manteniéndose vigente en la actualidad.

A continuación se presenta esta técnica de manera que el sistema de control pueda adaptarse a las variaciones propias y ajenas del sistema físico a controlar, de esta manera el controlador debe estar en la capacidad de mantener la salida deseada del sistema físico para la dinámica propia del sistema e incluso ante las perturbaciones externas. Es necesario entonces conocer los parámetros de la planta que pueden ser obtenidos mediante una de las técnicas de identificación como las descritas en [1]. El esquema básico de un controlador PID para que opere de forma auto-sintonizada es presentado en la Figura 4. Los vectores  $\hat{y}$  y  $\hat{e}$  son la salida y el error estimados, mientras que  $u$  y  $e$  son la señal de control y el error entre la salida deseada  $y^*$  y la del sistema en lazo cerrado  $y$ . Finalmente,  $\theta$  son los parámetros de la planta entregados por el identificador adaptativo.

Figura 4. Sistema de Control PID Auto sintonizado

La función de transferencia del Controlador PID



autosintonizado, es dada por:

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{n_2 z^2 + n_1 z + n_0}{z^2 - z} \quad (3)$$

Donde:

$$n_2 = k_p + k_i + k_d \quad n_1 = -k_p - 2k_d \quad n_0 = k_d \quad (4)$$

De donde son obtenidas las ganancias proporcional, diferencial e integral:  $k_p$ ,  $k_d$ , y  $k_i$ , respectivamente.

Si la planta es representada por medio de su función de transferencia:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0} \quad (5)$$

Y con la solución del sistema en lazo cerrado [4] de la Figura 4 se obtiene el denominador de la función de transferencia de la forma:

$$D(z) = z^5 + (a_2 + b_2 n_2 - 1)z^4 + (b_2 n_1 + b_1 n_2 + a_1 - a_2)z^3 + (b_2 n_0 + b_1 n_1 + b_0 n_2 + a_0 - a_1)z^2 + (b_1 n_0 + b_0 n_1 - a_0)z + b_0 n_0 \quad (6)$$

Se menciona el hecho que si se desea controlar un sistema de tercer orden, será necesario ubicar cinco polos dado que como se mencionó antes, el PID introduce dos nuevos polos al sistema comportándose como uno de orden  $n+2$ , para el caso que se cuente con un sistema de orden cinco, debe considerarse el polinomio característico asociado a este orden, dado por:

$$p(z) = (z - p_1)(z - p_2)(z - p_3)(z - p_4)(z - p_5) \quad (7)$$

Resolviendo el anterior polinomio y realizando algunas manipulaciones matemáticas, se obtiene:

$$\begin{aligned} p(z) &= z^5 - \sum_{i=1}^5 p_i z^4 + (a + \sum_{i=1}^3 p_i X + Y) z^3 \\ &\quad - (a X + (p_1 + p_2) Y + b) z^2 + (b X + a Y) z - \prod_{i=1}^5 p_i \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= p_1 p_2 + p_3 (p_1 + p_2); \quad b = p_1 p_2 p_3 \\ X &= p_4 + p_5; \quad Y = p_4 p_5 \end{aligned}$$

Finalmente, si se compara el polinomio característico de (8) con el denominador de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado mostrado en (6), se obtiene un sistema de ecuaciones como el mostrado en (9), que contiene los polos conocidos  $p_1, p_2, p_3$  y los parámetros del sistema identificado  $a_i$  y  $b_i$ , que al ser resuelto arroja como resultado los valores de  $n_0, n_1, n_2$  así como la suma y el producto de los polos  $p_4$  y  $p_5$  con lo que el sistema será totalmente controlable si estos dos últimos polos son estables, dentro del círculo unitario en tiempo discreto, desde el punto de vista del mundo digital.

$$\begin{bmatrix} b_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ b_1 & b_2 & 0 & -(p_1 + p_2 + p_3) & -1 \\ b_0 & b_1 & b_2 & p_1 p_2 + (p_1 + p_2) p_3 & p_1 + p_2 + p_3 \\ 0 & b_0 & b_1 & -p_1 p_2 p_3 & -(p_1 p_2 + (p_1 + p_2) p_3) \\ 0 & 0 & b_0 & 0 & p_1 p_2 p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \\ n_1 \\ n_0 \\ X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_2 + (p_1 + p_2 + p_3) \\ a_2 - a_1 + p_1 p_2 + (p_1 + p_2) p_3 \\ a_1 - a_0 - p_1 p_2 p_3 \\ a_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nótese que se cuenta con cinco polos  $p_1, p_2, p_3, p_4$  y  $p_5$  que regirán el comportamiento del sistema tanto en su estado transitorio como en el régimen permanente, y que

son obtenidos de reemplazar los coeficientes  $n_i$  en (6) una vez sea resuelto el sistema (9).

Como se cuenta con las tres ganancias del controlador PID, es posible buscar que el sistema se comporte como un sistema de segundo o tercero orden si así se desea actuando directamente sobre tres de los polos, esto es, sobre  $p_1, p_2$  y  $p_3$ , es decir, no se tendrá un control directo sobre los dos polos restantes por la limitante que introduce este tipo de control con sus únicas tres ganancias para sistemas de orden superior; por este motivo tanto la suma como el producto de los dos polos desconocidos,  $p_4$  y  $p_5$ , será considerada dentro del modelo como dos variables adicionales, X e Y, tal como se observa en la ecuación (8).

En general para el comportamiento deseado de una planta pueden ser considerados al menos dos de los polos como una pareja de polos conjugados, así:  $p_2 = p_1^*$ ; mientras que el tercer polo  $p_3$  será un polo real que puede tomar cualquier valor dependiendo de las necesidades del controlador, por ejemplo, éste podrá ser un polo real negativo alejado del origen en el dominio de "s" o cercano al origen del círculo unitario en el dominio de "z"; con el fin de que el comportamiento del sistema se asemeje al de uno de orden dos, siempre y cuando los polos  $p_4$  y  $p_5$  sean estables y cercanos al origen.

### 2.3.2 Control por reubicación de polos

A continuación se hace referencia a la técnica de reubicación de polos en un esquema adaptativo [2, 3, 5], de especial interés para el desarrollo de este artículo.

En la Figura 5 se presenta el diagrama esquemático del control por reubicación de polos en lazo cerrado. En la figura se presentan como parámetros claves, además de los mencionados para la Figura 4,  $u_c$  y  $u$  señales de control antes y después del integrador.

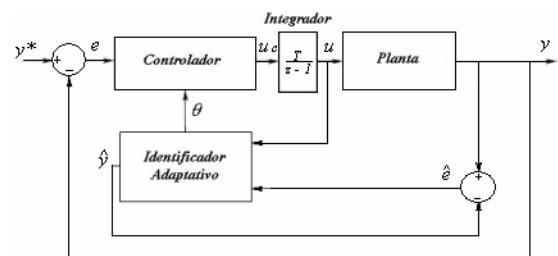


Figura 5. Sistema de Control por Reubicación de Polos

Para el caso de un sistema de tercer orden, como el considerado en este trabajo, las funciones de transferencia del controlador y la planta (incluido el bloque integrador), están dados por:

$$H_C = \frac{N_C(z)}{D_C(z)} = \frac{p_3 z^3 + p_2 z^2 + p_1 z^1 + p_0}{l_3 z^3 + l_2 z^2 + l_1 z^1 + l_0}$$

$$H_P = \frac{N_P(z)}{D_P(z)} = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^4 + a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0}$$

Note que si  $T$  es el tiempo de muestreo, para la planta, considerando, el integrador, se tiene:

$$\begin{aligned} a'_3 &= a_2 - 1; a'_2 = a_1 - 1; a'_1 = a_0 - 1; a'_0 = -a_0 \\ b'_2 &= T b_2; b'_1 = T b_1; b'_0 = T b_0 \end{aligned}$$

De la función de transferencia en lazo cerrado y el polinomio característico deseado se obtiene el sistema matricial (10).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a'_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a'_2 & a'_3 & 1 & 0 & b'_2 & 0 & 0 & 0 \\ a'_1 & a'_2 & a'_3 & 1 & b'_1 & b'_2 & 0 & 0 \\ a'_0 & a'_1 & a'_2 & a'_3 & b'_0 & b'_1 & b'_2 & 0 \\ 0 & a'_0 & a'_1 & a'_2 & 0 & b'_0 & b'_1 & b'_2 \\ 0 & 0 & a'_0 & a'_1 & 0 & 0 & b'_0 & b'_1 \\ 0 & 0 & 0 & a'_0 & 0 & 0 & 0 & b'_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_3 \\ l_2 \\ l_1 \\ l_0 \\ p_3 \\ p_2 \\ p_1 \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_7 \\ d_6 \\ d_5 \\ d_4 \\ d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Al resolver el sistema matricial, se obtienen los coeficientes de la función de transferencia tanto del numerador como del denominador, y el sistema tendrá el comportamiento del sistema que responde al polinomio característico deseado, dado por los coeficientes  $d_i$ .

Se menciona que  $d_7 = 1$ , de donde  $l_3 = 1$ , resolviendo el sistema (11) se tiene que la señal de control digital sería:

$$u_c(k) = -l_2 u_c(k-1) - l_1 u_c(k-2) - l_0 u_c(k-3) + p_3 e(k) + p_2 e(k-1) + p_1 e(k-2) + p_0 e(k-3) \quad (11)$$

Donde  $k$  corresponde a la  $k$ -ésima iteración dentro de un proceso autosintonizado.

## 2.4 Control de Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO en general presentan interacción entre cada una de las salidas y sus diferentes entradas [1], existen, sin embargo, algunos sistemas que pueden ser modelados como sistemas de lazos múltiples independientes siempre y cuando exista dependencia fuerte entre cada salida y una única entrada, sin embargo, como fue analizado en [2] y [3], el sistema puede ser modelado como un sistema multivariable de lazos independientes que es en general el análisis a seguir dentro de este trabajo. Cabe anotar que aún cuando se consideran lazos independientes, éstos interactúan entre sí, de tal forma que cada lazo ve al otro como una perturbación, por lo que si se logra un control exitoso, los resultados demostrarían además robustez en cuanto a las perturbaciones se refiere.

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1 Sistema de Prueba

El caso de estudio considerado corresponde a los parámetros obtenidos mediante identificación adaptativa presentada en [2, 3], correspondiente a una planta real formada por un generador síncrono de cuatro polos, potencia 1/3 Hp, 1800 RPM, 120 V. Para esta planta  $y_1$  es la velocidad en el eje o más específicamente su frecuencia de operación, mientras que  $y_2$ , es el nivel de tensión o voltaje generado en terminales de la máquina síncrona. Equivalentemente, las dos entradas o señales de control,  $u_1$  y  $u_2$ , son respectivamente, la velocidad del primomotor (*motor de inducción*) acoplado al eje del generador y la corriente de campo que puede ser controlada variando la tensión aplicada al devanado rotórico (excitación) de la máquina sincrónica. Nótese pues que el sistema consiste en el control tanto de la frecuencia como el voltaje en terminales del generador síncrono por medio de las entradas de velocidad de su primomotor y el voltaje aplicado a la excitación, campo o rotor de la máquina síncrona, por lo que se dice que el sistema es de dos entradas y dos salidas.

Para la planta a controlar se tiene una fuerte incidencia de la entrada de velocidad sobre la salida de frecuencia y de forma menos incidente sobre el voltaje generado, mientras que la corriente de campo incide fuertemente sobre el voltaje generado y de forma muy leve sobre la frecuencia de operación del sistema en su conjunto, es por ello que se considera el sistema como un sistema M.I.M.O. desacoplado [2], desde el punto de vista del diseño del controlador, en el que cada entrada incide directamente sobre cada salida. La forma de medir el grado de interacción se analiza en [2, 3] y [9]. Al no considerarse los términos cruzados se pierde algo de robustez frente a la dinámica misma del sistema y a las perturbaciones ajenas a éste, sin embargo, el control será igualmente exitoso si se logra sintonizar adecuadamente y de forma robusta cada lazo por separado.

La matriz de transferencia de la planta dada por las funciones (13), se obtuvo por medio de la identificación en línea en [2] utilizando el lenguaje de programación C++ Builder y por medio de adquisición de datos en tiempo real [8] por el método de proyección ortogonal en un estudio previo descrito detalladamente en [1].

$$\begin{aligned} H_{11} &= \frac{0.25z^2 + 0.15z + 0.12}{z^3 - z^2 + 0.57z - 0.082}; H_{12} = \frac{0.1z^2 + 0.24z + 0.2}{z^3 - z^2 + 0.57z - 0.082} \\ H_{21} &= \frac{0.25z^2 + 0.15z + 0.12}{z^3 - 0.2z^2 + 0.25z - 0.05}; H_{22} = \frac{0.1z^2 + 0.24z + 0.2}{z^3 - 0.2z^2 + 0.25z - 0.05} \end{aligned} \quad (13)$$

### 3.2 Respuesta del Sistema en Lazo Abierto

Para el caso en que no se considere ningún controlador, la respuesta del sistema al ser excitado, corresponde a la salida del sistema en lazo abierto, las salidas bajo esta condición de operación son mostradas en las Figuras 6 y 7, para velocidad y nivel de tensión respectivamente.

Se puede observar claramente que tanto el lazo de velocidad como el de voltaje presentan problemas para seguir la referencia, para el caso de velocidad la salida correspondiente es de 1.0656 p.u., mientras que para el caso de la salida de voltaje se tiene un valor de 0.5400 p.u., se nota entonces que las dos salidas deben ser controladas para que el sistema siga la referencia deseada, en este caso de 1.0 en p.u. para ambas señales. Las bases del sistema de prueba son los valores nominales de 1800 RPM y 120 V, para la velocidad y el nivel de tensión respectivamente.



Figura 6. Salida de Velocidad en Lazo Abierto



Figura 7. Salida de Voltaje en Lazo Abierto

### 3.2 Controlador PID

Mediante MatLab, versión 7.0, y por medio de Simulink, se simuló el sistema de prueba mostrado en la figura 8. Nótese que los parámetros  $n_2$ ,  $n_1$ , y  $n_0$ , del controlador PID, son variables que se calculan con base en la estrategia de control descrita en el numeral 2.3.1 que resultan de resolver el sistema (10), estos parámetros son obtenidos con la aplicación de una heurística que permite mantener bajo cualquier condición o cambios paramétricos,  $n_2 > 0$  y el rango  $-2 < X < 2$ , para garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Otro de los detalles importantes en la implementación es que se deben considerar elementos de saturación para evitar que la señal de control exceda límites imposibles de alcanzar en una aplicación de tipo práctico. La

saturación es atacada, como mencionan algunos autores [6], con la estrategia del *antiwindup*. Las respuestas del sistema multi-variable controlado por dos lazos de control PID se presentan en las Figuras 9 y 10.

### 3.3 Control por Reubicación de Polos

Los resultados obtenidos implementando la técnica de control por reubicación de polos son los mostrados en las Figuras 12 y 13 para los lazos de velocidad y voltaje respectivamente. En la Figura 11 se presenta el esquema básico de control implementado en el Simulink.

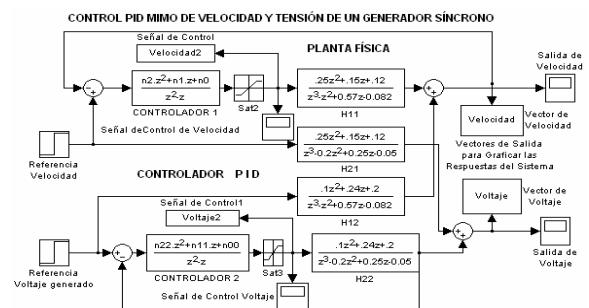


Figura 8. Esquema de Control PID



Figura 9. Salida de Velocidad Controlada por un PID



Finalmente, haciendo referencia a las Figuras 12 y 13, se nota una mejor respuesta del control por reubicación de polos, en especial para el lazo de velocidad, básicamente porque este tiene tantos grados de libertad como polos

tenga el sistema físico a controlar logrando ser mucho más robusto que el controlador PID, para el cual se presenta picos más pronunciados en la etapa transitoria. Vale la pena mencionar además que la técnica de control por reubicación de polos ya fue implementada en el sistema físico real de prueba en [2] y [3], precisamente los parámetros a los que se hace referencia en este trabajo son los obtenidos por identificación en línea en aquellas aplicaciones, se demuestra entonces que los resultados teóricos son buenos estimativos de los esperados experimentalmente por lo que queda abierta la posibilidad de que sea implementado próximamente, como trabajo futuro, un PID en un sistema real, tal como se propone teóricamente en este artículo, para corroborar con ello la efectividad de esta técnica de control.

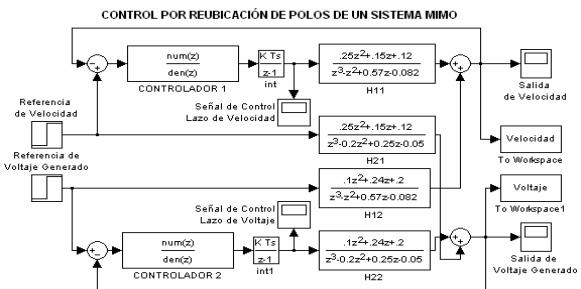


Figura 11 Esquema de Control por Reubicación de Polos

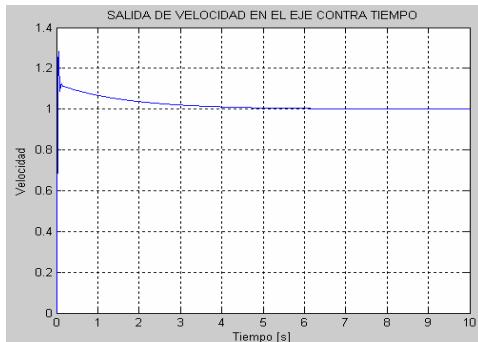


Figura 12. Salida de Velocidad Controlada por la Técnica de Reubicación de Polos



Figura 13. Salida de Velocidad Controlada por la Técnica de Reubicación de Polos

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio realizado se observa claramente que es posible controlar sistemas de varias salidas de forma

simultánea mediante la aplicación apropiada de las señales de control obtenidas de una buena estrategia de control.

El controlador PID arroja buenos resultados. Sin embargo como se mencionó previamente, es necesario tratar de mantener los polos  $p_4$  y  $p_5$  dentro del círculo unitario para evitar que estos conviertan el sistema en lazo cerrado en inestable, no obstante, superada esta dificultad, el esquema de control en lazo cerrado es bastante robusto. El Control por Reubicación de Polos, demuestra nuevamente ser una técnica bastante efectiva dado que esta permite obtener la respuesta deseada del sistema físico a controlar por medio de la manipulación de todos sus polos, convirtiendo el esquema en lazo cerrado en un gran sistema estable capaz incluso de atenuar perturbaciones propias y ajenas del sistema manteniendo las salidas en los niveles definidos según la señal de referencia.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Ing. Didier Giraldo Buitrago, profesor titular de la Universidad Tecnológica de Pereira por sus invalables aportes en el desarrollo del presente trabajo.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GOODWIN G. C., SANG S. K., "Adaptive Filtering, Prediction and Control", Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [2] BOLAÑOS O. R., CORREA, F. A., "Identificación y Control de Sistemas MIMO Mediante Técnicas Adaptativas", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [3] GIRALDO, B. D., CORREA F. A., BOLAÑOS O. R., "Control de Frecuencia y Voltaje en Tiempo Real de un Generador", *Revista Scientia Et Technica*. Año XIII, No 32. Enero de 2007. UTP. ISSN 0122-1701.
- [4] GIRALDO, B. D., MEJÍA, G. D., MOLINA C. A., "Control PID Autosintonizado Usando Identificación en Línea y Modelo de Referencia", *Revista Scientia Et Technica*, Año IX, No 21. Enero de 2003.
- [5] ESCOBAR M. A., BEDOYA E. J., "Control en Tiempo Real de la Velocidad de un Motor de Inducción Utilizando Técnicas Inteligentes", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.
- [6] "IEEE Control Systems Magazine, PID 2006", *Revista IEEE*, Volumen 26, Número 1, Febrero de 2006, Pags. 30 – 80.
- [7] GIRALDO, B. D., TABARES, G. I., "Teoría de Control", Universidad Tecnológica de Pereira, 1997.
- [8] Giraldo B. D., TABARES, G. I., GALVÁN, C. "Adquisición de Datos y Control en Tiempo Real de un Sistema Utilizando el Programa C++ Builder", *Revista Scientia Et Technica*, Año V, No10, Julio de 1999.
- [9] [http://www.chemengr.ucsb.edu/~ceweb/faculty/seborg/teaching/SEM\\_2\\_slides/Ch18\\_1\\_25\\_05.ppt](http://www.chemengr.ucsb.edu/~ceweb/faculty/seborg/teaching/SEM_2_slides/Ch18_1_25_05.ppt)