

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA PARA LABORATORIO CONTROLADO POR PC EN TIEMPO REAL.

Palmieri Diego¹ Pucci Martín Ariel

*IACI, Universidad Nacional de Quilmes
Sede Florencio Varela: Av. Calchaquí alt. 5800 km 23,5
F. Varela (CP: 1888) Buenos Aires - Argentina
Tel: (54-11) 4275-7714 Fax: (54-11) 4275-7716. email:
iaci@unq.edu.ar*

Resumen: Este trabajo presenta la construcción de un Sistema de Levitación Magnética para laboratorio y su posterior control a través de una PC. Sensando la posición del cilindro metálico, se controla la corriente de una bobina, encargada de producir el campo magnético necesario para la levitación. Una vez construido el sistema, se modelizó matemáticamente utilizando las ecuaciones del Segundo Principio de Newton. Se diseñaron diversos controladores PID para la implementación del control en tiempo real utilizando una placa adquisidora de datos junto con el software MATLAB, SIMULINK, Real Time Workshop y Real Time Windows Target.

:

Keywords: Fuerza antigravitacional, Levitación, Filtro de ruido.

1. INTRODUCCIÓN

En muchas situaciones se desea hacer levitar un objeto mediante un campo magnético. Por ejemplo en los túneles de viento, la estructura mecánica que soporta al modelo en estudio introduce errores en la medición de empuje y elevación. Una solución a este problema es utilizar un campo magnético para sostener al modelo sin dificultar las mediciones. Considerando que el fluido es un gas ordinario no conductor el campo no interferirá en el flujo de aire.

La Figura 1 muestra el sistema de levitación magnética construido, en el que un cilindro metálico se suspende o levita mediante un campo magnético generado por un electroimán (bobina) controlado por una fuente de corriente.

El objetivo principal es mantener al cuerpo a una cierta distancia del electroimán. La medición de



Figura 1. Sistema de Levitación Magnética

dicha distancia se realiza por medio de un sensor óptico. La introducción de un controlador es necesaria para mantener en equilibrio la fuerza gravitacional del cuerpo y la del campo magnético.

¹ Instructor IACI, UNQ

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la introducción se presentó el sistema a controlar sin entrar en detalles de la producción de la fuente de fuerza antigravitacional ni de las mediciones que debemos realizar. La fuente de fuerza antigravitacional del sistema es un campo magnético generado por una bobina, utilizada para contrarrestar la fuerza de gravedad ejercida sobre la masa m del cuerpo por el campo gravitatorio terrestre. Para el controlador es necesario, como ya se mencionó, la medición de la posición del cuerpo, utilizando para ello un sensor óptico. La Figura 2 muestra un diagrama en bloques del sistema construido.

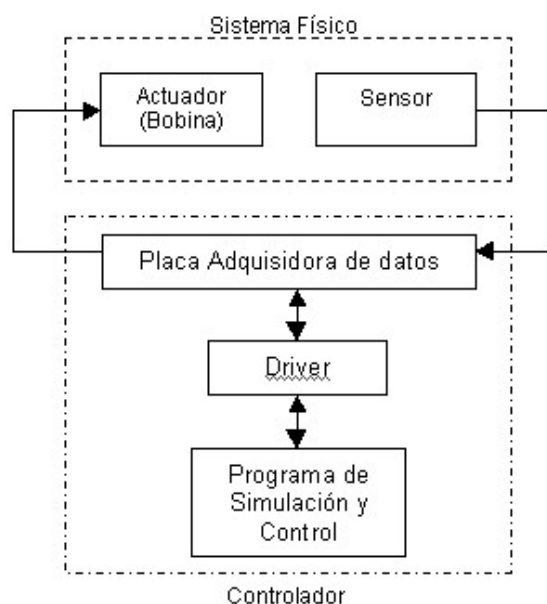


Figura 2. Diagrama en bloques del sistema

El bloque controlador representa la implementación del control a través de una PC que cuenta con una placa adquisidora de datos marca *National Instruments* y el conjunto de programas que utilizamos para el manejo de la misma y para la simulación e implementación de los controladores en la PC. Estos programas son: Real Time Workshop, Real Time Windows Target, MATLAB y SIMULINK.

La utilización de estos programas permiten la simulación interactiva del sistema, permitiendo el cambio de parámetros de los controladores *on-line*, analizando lo que sucede inmediatamente, ideal para el trabajo en laboratorio.

El bloque actuador representa a la bobina encargada de entregar el campo magnético necesario para producir la levitación. La misma se construyó con núcleo de ferrite para reducir los efectos de histéresis, y es alimentada mediante una fuente de corriente electrónica.

Por último el bloque sensor esta compuesto por el instrumento que nos entrega la información de la posición vertical del cuerpo metálico.

3. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Una forma de encontrar la ecuación de movimiento del cuerpo del sistema representado por la Figura 3, es aplicando el Segundo Principio de Newton dado por la ecuación 1.

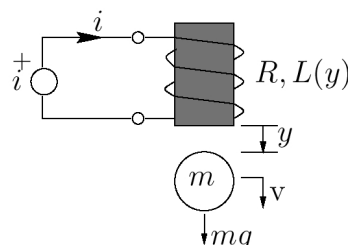


Figura 3. Levitación magnética

$$\Sigma F = ma \quad (1)$$

donde ΣF son las fuerzas aplicadas al sistema, m es la masa del cuerpo y a es la aceleración del mismo.

Las fuerzas que actúan sobre el sistema son:

mg : Fuerza producida sobre la masa m del cuerpo debido a la aceleración del campo gravitatorio terrestre g .

kv : Fuerza originada por la fricción o rozamiento del cuerpo. Esta fuerza crece con la velocidad v , es decir que va a ser mayor cuanto mas rápido se mueva el cuerpo oponiéndose siempre al sentido de movimiento. k es el coeficiente de fricción viscosa.

$F(y, i)$: Fuerza ejercida por la bobina, dependiente de la posición del cuerpo y de la corriente. $y > 0$ es la posición vertical (hacia abajo) del cuerpo medida desde un punto de referencia ($y = 0$ cuando la bola está pegada a la bobina), e i es la corriente.

La sumatoria de fuerzas esta dada por la ecuación 2 (Khalil, 1987).

$$\Sigma F = mg - kv + F(y, i) \quad (2)$$

Por lo tanto igualando 1 y 2 nos queda que

$$mg - kv + F(y, i) = ma \quad (3)$$

Para interpretar el comportamiento de la fuerza aplicada por la bobina sobre el cuerpo, debemos analizar el comportamiento de la inductancia de la bobina en presencia del cuerpo metálico. Esta inductancia puede modelarse por la ecuación 4 (H.H. Woodson, 1968).

$$L(y) = L_1 + \frac{L_0}{1 + \frac{y}{c}} \quad (4)$$

donde L_1 , L_0 y c son constantes que se obtienen de mediciones.

Este modelo representa el caso en el que la inductancia tiene su máximo valor cuando el cuerpo esta pegado a la bobina $L(y) = L_1 + L_0$, y decrece a medida que el mismo se aleja hasta $y = \infty$; $L(y) = L_1$.

Las constantes se obtuvieron según el siguiente procedimiento:

- Se realizaron tres mediciones de inductancia: $L(x = \infty)$, $L(x = 0)$ y $L(x = 6mm)$.
- Se calcularon las constantes a partir de la ecuación 4.

Una vez obtenido el modelo de la variación de la inductancia, tomando $E(y, i) = \frac{1}{2}L(y)i^2$ como la energía almacenada en la bobina, la fuerza $F(y, i)$ esta dada por:

$$F(y, i) = \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{L_o i^2}{2c(1 + \frac{y}{c})^2} \quad (5)$$

De ésta manera se define la ecuación que describe la dinámica del sistema,

$$mg - kv + \frac{L_o i^2}{2c(1 + \frac{y}{c})^2} = ma \quad (6)$$

3.1 Ajuste de Parámetros

Para ajustar el parámetro desconocido k de la planta (coeficiente de fricción viscosa), se realizó el siguiente ensayo:

- Se ensayó el sistema real a lazo cerrado con un controlador PI exitado con un escalón de referencia que va de $5mm$ a $2mm$.
- Se registró la curva de la posición
- Se simuló en SIMULINK el modelo no lineal a lazo cerrado con el mismo controlador que con el modelo real, con un valor de k al azar a modo de prueba.
- Se registró la curva de la posición
- Se compararon ambas curvas.
- Se repitieron los puntos anteriores variando el valor de k en el modelo no lineal varias veces hasta encontrar aquel valor en que las curvas de posición lograron parecerse.
- Una vez encontrado un valor adecuado, se volvió a realizar el ensayo pero esta vez con un doble escalón de excitación que va primero de $5mm$ hasta $2mm$ y luego de $5seg$ se produce un cambio de $2mm$ hasta $3,5mm$.
- Se ajustó el valor encontrado de k hasta satisfacer ambas curvas.

La Figura 4 muestra la posición del modelo real y la posición del modelo no lineal simulado con una referencia que va de $5mm$ a $2mm$. La Figura 5 muestra en cambio la posición del modelo real y

la posición del modelo no lineal simulado con una referencia que va de $5mm$ a $2mm$ y luego de $5seg$ se cambio a $3,5mm$.

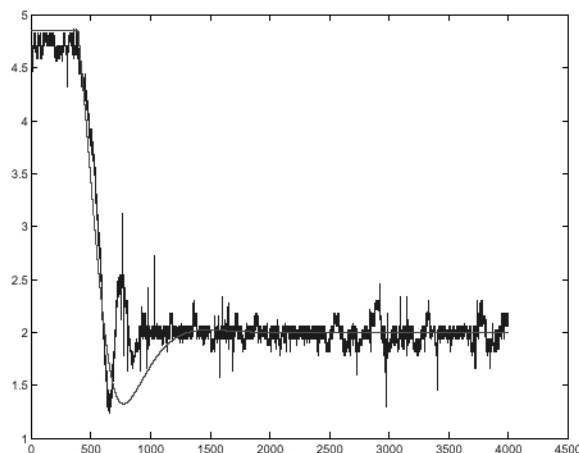


Figura 4. Posicion Real vs. Ideal

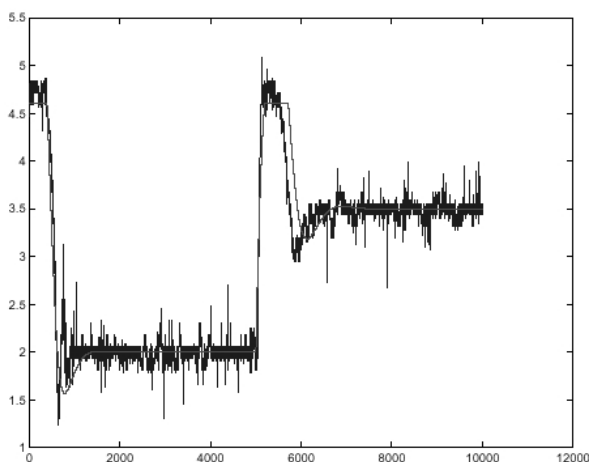


Figura 5. Posicion Real vs. Ideal

Finalmente, los valores de los parámetros de la planta son los siguientes:

Parámetro	Valor	Unidad
m	0.06	Kg
g	9.8	$\frac{m}{s}$
L_0	17	$Henry$
L_1	59	$Henry$
c	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$Metros$
k	25	$\frac{Nm}{s}$
R	8.6	$Ohms$
N	1280	—

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El objetivo principal del controlador es estabilizar el lazo de control. En segundo lugar debemos obtener seguimiento a una referencia constante de posición y rechazo de perturbaciones constantes. Por último la respuesta debe tener un tiempo

de crecimiento y establecimiento rápido, con un sobrevalor pequeño en relación a la posición final.

Para obtener los parámetros de los controladores PID se aplicaron los métodos clásicos de ajuste de Ziegler and Nichols, los cuales son: el **Método de Oscilación** o *Método de Respuesta en Frecuencia* y el **Método de Respuesta al Escalón** o *Método Basado en la Curva Reacción* (K.J. Armstrong, 1998). Si bien estos métodos se presentan para sistemas estables, los valores obtenidos por los métodos de Ziegler and Nichols se utilizaron como valores iniciales para el ajuste final, el cual se realizó buscando las ganancias óptimas para el desempeño deseado. Existen métodos de ajuste de controladores PID para sistemas inestables. Uno de ellos se basa en el máximo pico de resonancia y utiliza como herramienta el diagrama de Nichols (E. Poulin, 1998). Otro se basa en la aplicación de Loop-shaping H_∞ , en donde se aproxima un controlador de este estilo a un PID y de esta se obtienen los parámetros del mismo. Obteniéndose un controlador robusto (W. Tan, 1999). Estos últimos pueden ser ensayados y aplicados por aquellas personas que utilicen este sistema en el laboratorio.

4.1 Controlador PI

El controlador PI implementado en SIMULINK se muestra en la Figura 6. Una vez aplicados los métodos de ajuste de Ziegler and Nichols, se ajustaron los valores dados para satisfacer al desempeño deseado. Los valores de K_p y K_i para el correcto desempeño se muestran en la tabla 1.

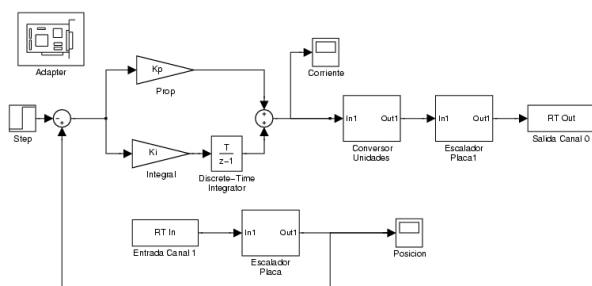


Figura 6. Diagrama de bloques de la implementación del control PI.

PI	K_p	K_i
	0.4	0.6

Tabla 1. Parámetros de ajuste del PI

Los resultados obtenidos con este controlador se muestran en la Figura 7, para una excitación con un escalón de posición de 5mm a 2.5mm .

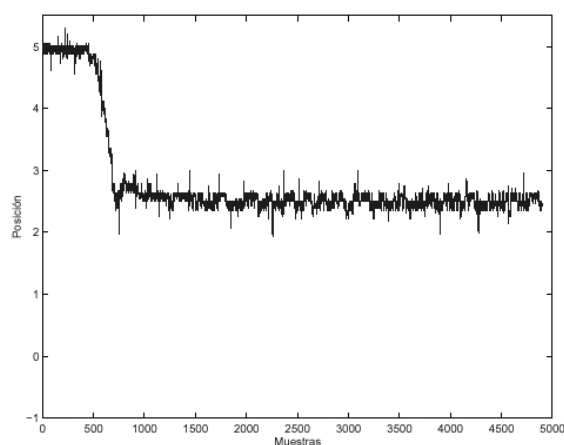


Figura 7. PI ajuste final

4.2 Controlador PID

El controlador PID implementado en SIMULINK se muestra en la Figura 8. Al igual que con el controlador PI se ajustaron los valores dados por los métodos de ajuste para satisfacer el desempeño deseado. Los valores de K_p , K_i y K_d para el correcto desempeño se muestran en la tabla 2.

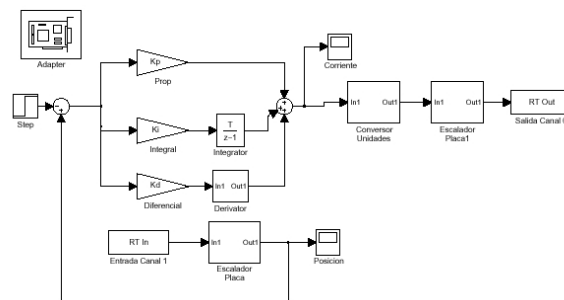


Figura 8. Diagrama de bloques de la implementación del control PID.

	K_p	K_i	K_d
PID	0.4	0.6	0.0005

Tabla 2. Parámetros de ajuste definitivo del PID

Los resultados obtenidos con el controlador PID se muestran en la Figura 9, también para una excitación con un escalón de posición de 5mm a 2.5mm .

Se observa que con el PI se obtiene una respuesta un poco mas lenta que con el PID, la desventaja del controlador PID es que la acción diferencial produce un mayor sobrevalor. Este sobrevalor también es producto de que la misma *amplifica* el ruido de medición, produciendo picos mayores de corriente (ver Figura 10), lo que a consecuencia trae aparejado un mayor sobrevalor.

En cuanto al control PI, se observa un correcto desempeño, ya que prácticamente no se observa sobrevalor y su respuesta es tan rápida como con el PID.

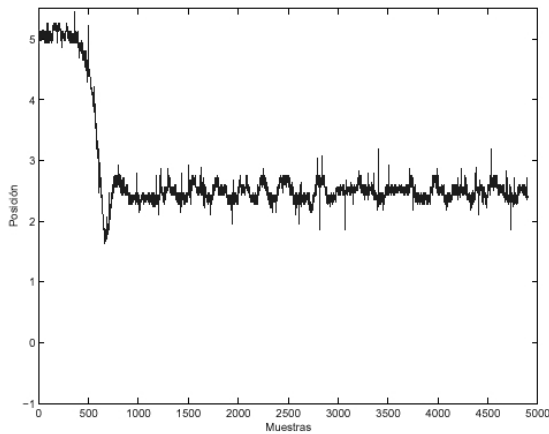


Figura 9. PID ajuste final

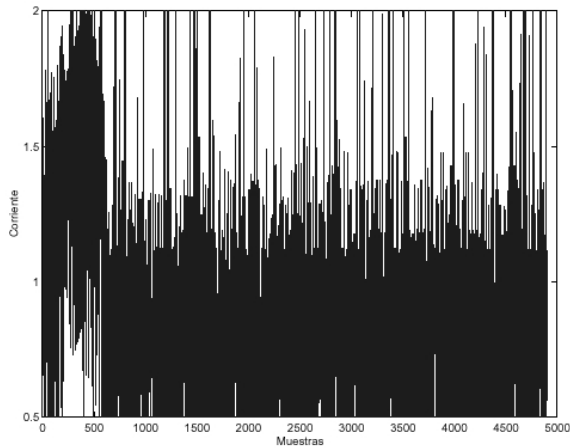


Figura 10. Salida de actuación del PID

5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS PERTURBACIONES

La principal perturbación que posee el sistema es el ruido de medición. El mismo es producto del rango de trabajo del sensor. Entre $0mm$ y $5mm$ de distancia entre el cuerpo y la bobina, la diferencia de tensión de salida del sensor varía de $0volts$ a $0,5volts$, esta pequeña diferencia es amplificada para transformarla al rango de $0mm$ a $5mm$ en el programa de simulación. Al hacer esto se amplía también el ruido propio del sensor. Ruido que le quita eficacia al controlador y lo hace mas sensible. Es por esto que el controlador PID no tiene el desempeño que se esperaba tener. Para tratar de minimizar el ruido, se introdujo un filtro de corte para las altas frecuencias dado por la ecuación 7. La Figura 11 muestra como se implementó el sistema con el filtro de ruido en SIMULINK.

$$F(z) = \frac{1 - 0.62}{(1 - 0.62z^{-1})} \quad (7)$$

Si observamos el diagrama de Bode de la función de transferencia del filtro (Figura 12), se puede observar que decae la magnitud en las altas fre-

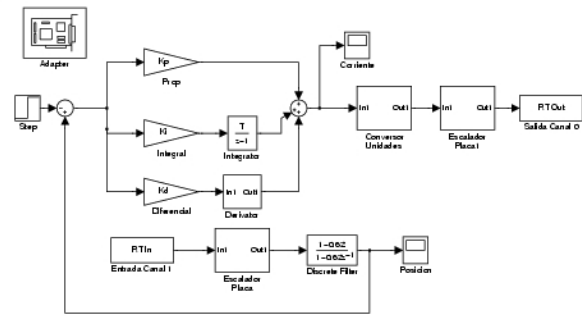


Figura 11. Diagrama de bloques de la implementación del control PID con filtro.

cuencias. Esto se traduce a que atenuará el ruido sin agregar demasiada dinámica al sistema. La incorporación de un filtro puede ocasionar que el controlador no funcione de forma correcta como se lo espera, ya que el filtro al ser un "pasa bajos", agrega retardo y en consecuencia cambie la respuesta del sistema.

En este caso, el filtro fue seleccionado por medio de pruebas, comenzando de un filtro muy rápido con un polo cerca de "1", para luego bajar el valor del polo hasta observar un filtrado casi óptimo con la mínima introducción de retardo. Además sin modificar los parámetros de los controladores, se verificó que no cambia el desempeño de los mismos.

El resultado del sistema con filtro de ruido y controlador PID se muestra en la Figura 13. A modo de comparación se puede observar que la actuación de salida del PID (Figura 14) es una señal mucho menos ruidosa, mejorando así la respuesta del sistema y logrando de esta manera el desempeño deseado y esperado del controlador PID. Los parámetros del mismo son los que figuran en la tabla 2.

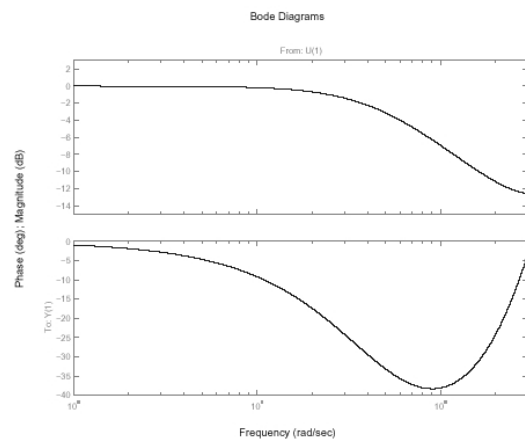


Figura 12. Diagrama de Bode del filtro de ruido

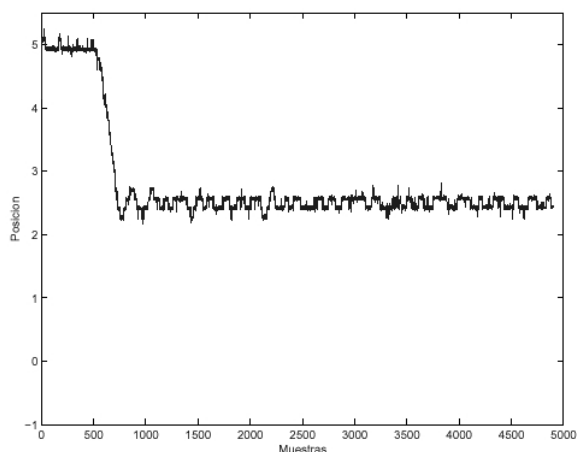


Figura 13. Salida PID con filtro

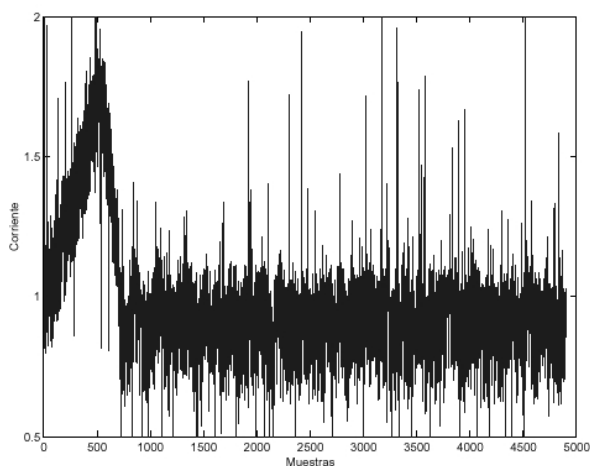


Figura 14. Salida de actuación del PID con filtro

6. CONCLUSIONES

La elección de aplicar un software en tiempo real permitió implementar las diferentes variantes de los controladores PID en forma rápida y sencilla, permitiéndo almacenar los datos obtenidos del sistema para el análisis y ajuste de los parámetros obtenidos por el modelo matemático. Además, dejando la posibilidad de la implementación de diferentes controladores para futuros proyectos.

Las técnicas de control que se desarrollaron son técnicas lineales. Aunque se utilizó como planta un sistema no lineal, se pudo mostrar que es posible desarrollar técnicas de control simples aunque el modelo sea complejo.

Los métodos usados para el ajuste de los parámetros de los controladores de la familia de PID, están definidos para sistemas estables. Dado que el sistema es inestable, dichos métodos se aplicaron para una primera aproximación de valores.

El desempeño del sistema con la implementación de los controladores PI y PID fue bueno, desde el punto de vista de controlar la posición del cuerpo y obtener un seguimiento a referencias constantes, en un tiempo de establecimiento corto y con un

bajo valor de sobrevalor. La implementación de un filtro destinado a eliminar ruido producido por el sensor, llevó a obtener un mejor desempeño del controlador PID en relación al desempeño del controlador PI.

7. REFERENCES

- E. Poulin, A. Pomerlau (1998). *PID tuning for integrating and unstable processes*. IEEE.
- H.H. Woodson, J.R. Melcher (1968). *Electromechanical Dynamics Part II*.
- Khalil, H. (1987). *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall.
- K.J. Amstrong, T. Hagglung (1998). *Automatic Tuning of PID Controller*. Instrument Society of America.
- W. Tan, Y. Yuan, Y.Ñiu (1999). *Tuning of PID Controller for unstable process*. IEEE.