

## Banco de servomecanismos analógico-digital para experimentación y entrenamiento didáctico

Jorge Javier A. (1), Brizuela José A. (1), Apóstoli R. S.(2)

(1) Departamento de Electrónica. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.  
Universidad Nacional de Córdoba  
[javiebrkr@yahoo.com.ar](mailto:javiebrkr@yahoo.com.ar)    [jo\\_an\\_br@yahoo.com.ar](mailto:jo_an_br@yahoo.com.ar)

(2) Conicet y Secretaría de Ciencia y Tecnología . Facultad Regional Córdoba.  
Universidad Tecnológica Nacional  
[rsapostoli@arnet.com.ar](mailto:rsapostoli@arnet.com.ar)

**Resumen-** Se describe el desarrollo local de un banco de servomecanismos eléctrico analógico-digital, destinado a la experimentación y al entrenamiento didáctico con sistemas de posicionamiento automatizados. Este banco cuenta con amplias posibilidades de configuración para evaluar distintos tipos de compensaciones. Posee además un codificador óptico “encoder” incremental con el que se registra el movimiento de la carga, siendo sus pulsos enviados a una PC para el registro gráfico. Se pudieron de este modo evaluar los resultados prácticos y contrastarlos con las herramientas teóricas del análisis, diseño y simulación: curvas de raíces, Matlab y Simulink y respuestas transitorias.

**Palabras clave-** servomecanismos, codificador óptico, compensadores, excitadores de potencia y práctica didáctica.

### I INTRODUCCIÓN

En el diseño, desarrollo y enseñanza de sistemas de control automático se ha visto la necesidad de contar con un banco experimental donde se puedan corroborar las ideas, propuestas y algoritmos teóricos con un servomecanismo *en funcionamiento*. Desde hace algún tiempo se han desarrollado distintas aplicaciones (Apóstoli, Mármol). La fig. 1 muestra una foto del banco de servomecanismos desarrollado para probar el algoritmo de control digital PD implementado con un control dedicado Hewlett-Packard HTLC-1100. Se ha diseñado y construido un excitador de potencia “driver” con PWM y mosfets de potencia que permite controlar, por su puente H, un servomotor de C.C. de hasta 40 amps. a 100 v. La realimentación de posición, en este caso, la provee un “encoder” ROD de 2000 líneas. El motor es de muy baja inercia del tipo “servodisk” Kollmorgen. Entonces surgió la necesidad didáctica de disponer de un banco analógico para demostraciones sobre teoría de control clásico correspondientes al 1er. Curso de Control. A los fines de aprovechar las experiencias ya logradas con este banco digital, se agregó un potenciómetro tipo “Helipot” de 10 vueltas como sensor de posición.

La fotografía de la Fig. 2. exhibe la nueva disposición mecánica del conjunto. Se ha cambiado el motor por otro similar “servodisk” el que ya tiene incorporado un tacogenerador. La referencia de posicionamiento es otro potenciómetro “Helipot”.

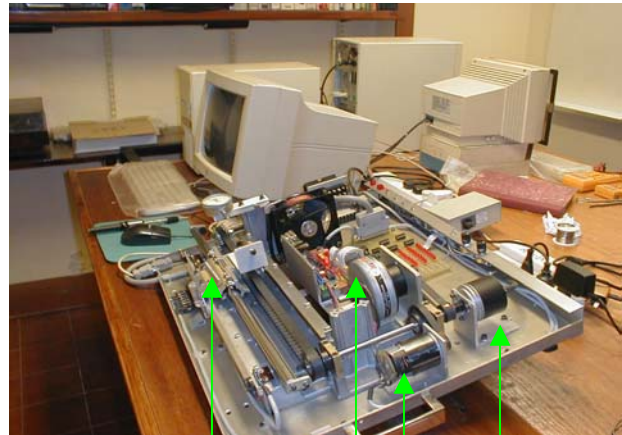
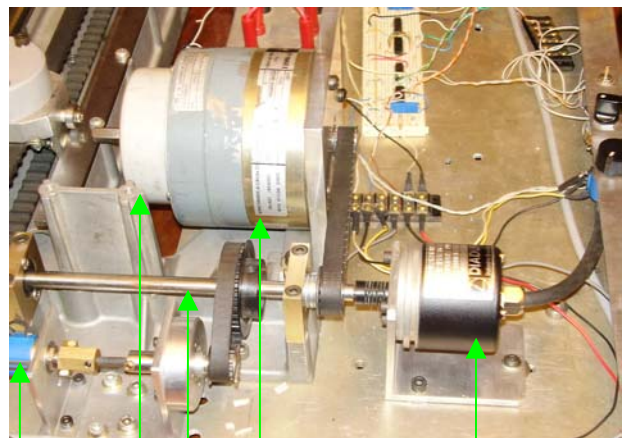


Figura 1. carga servomotor taco encoder



potenc. taco eje servomotor encoder

Figura 2

## II DESARROLLO DEL BANCO

### A Descripción general

El servomotor de C.C. es de 20 V. y es alimentado por el “driver” con PWM a 24 KHz. el que es provisto por el Motorola 33035 diseñado para controlar servomotores “brushless” y adaptado para controlar motores de C.C. El ancho del pulso depende de la señal de entrada que proviene del detector de error, diferencia entre las tensiones de referencia y de realimentación, ambas provistas por los dos “Helipot” de 10 vueltas y 0.25 % de linealidad. En la fig. 3 se indica el diagrama de bloques básico del banco. El tacogenerador, unido directamente al eje del servomotor, provee una tensión proporcional a la velocidad instantánea, es decir suministra la derivada dinámica de la posición. Esto es sumamente conveniente para compensar por amortiguación las respuestas transitorias oscilantes.

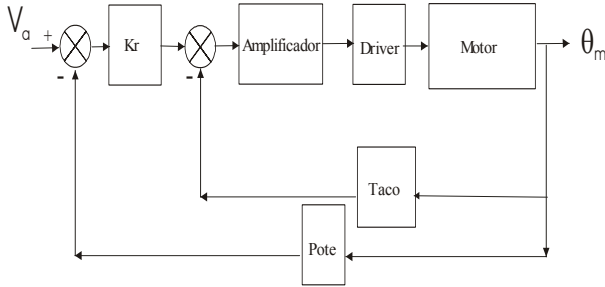


Figura 3

El motor se acopla mecánicamente por correa dentada a un eje de transmisión de acero al cual se encuentra unido el “encoder”. El giro del motor, por medio de otra correa dentada unida a una polea solidaria con el citado eje, hace que la carga se desplace en un recorrido lineal sobre rodamientos de bajo rozamiento. El encoder posee tres salidas: una señal de index que provee un pulso por cada vuelta del mismo, y dos señales más que dan 2000 pulsos por vuelta defasadas 90°. Mediante un interfase de baja impedancia y bajo ruido (dupla AM26 LS31/32) los datos recogidos son capturados en un archivo mediante un programa escrito en VC++ especialmente para esta aplicación. Una vez capturados los datos, son leídos para poder generar una gráfica posición vs. tiempo de la respuesta transitoria.

### B Modelización paramétrica

Culminado el montaje mecánico y las pruebas de funcionamiento eléctrico-electrónico del banco, se procedió con el modelado del sistema mediante la transformada de Laplace.

#### B1 Potenciómetros

El diagrama en bloque posee dos potenciómetros, el de entrada y el de realimentación. El de realimentación permite obtener una tensión proporcional al movimiento del eje de transmisión a partir de una relación de poleas:

$$e_R = K_S \theta_E \quad (1)$$

#### B2 Reducción mecánica

Como se explicó, el banco cuenta con un sistema de transferencia de potencia mediante poleas y un eje de acero. Entre el motor y el eje de transmisión la relación de transformación es de 1 a 1,6 y entre el eje de transmisión y el Helipot que genera la señal de error es de tres a uno. En este eje se fija la polea del desplazamiento lineal de la carga. El movimiento rotativo del eje es transformado al movimiento lineal mediante un sistema de dos poleas y una correa en la que se sitúa la carga, y es descrito por la siguiente ecuación:

$$x = \theta.R \quad (2)$$

Donde:

$x$  es el desplazamiento lineal de la carga,  $\theta$  es el movimiento angular del eje en radianes y  $R$  es el radio de la polea (18.1mm) que vincula al eje con la correa que sostiene a la carga.

$$\begin{aligned} \frac{r_1}{r_2} &= \frac{N_1}{N_2} \\ \theta_1 r_1 &= \theta_2 r_2 \\ \theta_1 T_1 &= \theta_2 T_2 \\ \frac{N_1}{N_2} &= \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

Ecuaciones 3

Despreciando la fricción viscosa y de Coulomb y además considerando que el momento de inercia de la carga reflejada al eje de transmisión es:

$$J_c = Mr_{p5}^2 \quad (4)$$

se tiene:

$$T_1 = J_{p6} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial t^2} \quad (5)$$

donde  $J_{p_i}$  es el momento de inercia de cada polea,  $J_c$  el de la carga,  $J_m$  el del motor y  $N_i$  es la cantidad de dientes de la polea.

$$T_2 = T_3 = \left[ \begin{array}{l} (J_{p5} + J_{p3} + J_{p2} + J_B) + \\ + \left( J_c + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot J_{p6} \right) + \\ + \left( \frac{N_6}{N_5} \right)^2 \cdot (J_{p4}) \end{array} \right] \cdot \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$T_4 = T = (J_{p1} + J_m + J_T) \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial t^2} + T_3 \cdot \frac{N_4}{N_3} \quad (7)$$

$$T = \left\{ \begin{array}{l} (J_{p1} + J_m + J_T) + \\ (J_{p5} + J_{p3} + J_{p2} + J_B) + \\ \left( J_c + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot J_{p6} \right) + \\ \left( \frac{N_6}{N_5} \right)^2 \cdot (J_{p4}) \end{array} \right\} \cdot \left( \frac{N_4}{N_3} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial t^2}$$

Ecuación 8

$$T = \left( 170.4 \times 10^{-6} \text{ Kg.m}^2 + J_m \right) \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial t^2} \quad (9)$$

Para verificar que la tarea fue bien realizada se utilizó el “software” de la empresa Kollmorgen denominado Motionering.

Para la relación motor-carga se tiene:

$$N_{m/c} = \frac{N_4}{N_3} \cdot R_{p5} = \frac{1}{1,6} \cdot 0,01814 = 0,0113375$$

Ecuación 10

### B3 Amplificador y Driver

Para el diseño del amplificador se tuvo que tener en cuenta lo siguiente:

- El rango dinámico de tensión de entrada del driver de potencia: Desde 2.4 V. a 4 V.
- El rango dinámico de tensión de entrada del motor. Desde 1 V. a 20 V. con corrientes de hasta 6 A.
- El funcionamiento digital del driver que obligaba a trabajar con tensiones de entrada al driver siempre positivas e invertir el sentido de circulación de corriente por el motor.

Esto debe contemplar el consiguiente cambio de sentido de rotación a través de una señal digital TTL.

Los citados condicionantes dieron como resultado:

- Tener en cuenta un umbral “offset” de entrada al driver a partir del cual con tensiones de entrada nulas no se mueva el motor, pero que con pequeñas tensiones de entrada se logra una respuesta del mismo.
- Considerar el rango dinámico de trabajo del driver modelado mediante las zonas de saturación.
- Disponer de un detector de valor absoluto a la entrada del driver para entrar siempre al mismo con valores de tensiones positivos. No se lo incluye en el modelo ya que no lo afecta.
- Disponer un detector de signo con salida TTL para habilitar el giro del motor en uno u otro sentido dependiendo del signo de la señal error.

Luego de que los circuitos de implementación se diseñaron, se decidió realizar una simulación en ORCAD Pspice 9.1 la cual cumplió con las expectativas. A partir de allí se realizó el diseño de la placa de circuito impreso en Protel 99 SE para su implementación física.

Como la salida del driver no es lineal, se decidió aproximarla a una recta que se trazó a partir de las mediciones realizadas a bornes del motor para las diferentes tensiones de entrada. Obteniendo como resultado:

$$\frac{e_{SAL}}{e_{ENT}} = 4,63 \quad (11)$$

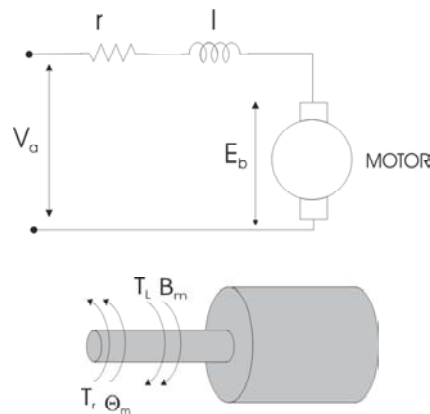
### B4 Tacogenerador

$$e_t = K_t \cdot \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = K_t \cdot \omega_m \quad (12)$$

Aquí la constante de proporcionalidad es de 3 V/1000 rpm o lo que es lo mismo 0.0286 V/rad/seg.

### B5 Servomotor

El motor utilizado es el F9M4R del tipo Servo-Disk.



$$v_a = r \cdot i + l \frac{\partial i}{\partial t} + e_b \quad (13)$$

$$T_m = J \frac{\partial^2 \theta_m}{\partial t^2} + B \frac{\partial \theta_m}{\partial t} + K_e \theta_m + T_l \quad (14)$$

$$T_m = K_i \cdot i \quad (15)$$

$$e_b = K_b \cdot \frac{\partial \theta_m}{\partial t} \quad (16)$$

$$w_m = \frac{\partial \theta_m}{\partial t} \quad (17)$$

Con las ecuaciones se realiza el diagrama de bloques y luego al aplicar al diagrama de flujo la fórmula de Mason se obtiene la función de transferencia:

$$\frac{\theta_m}{V_a} = \frac{K_i / l J_m}{s \left[ s^2 + \left( \frac{r J_m + l B_m}{l J_m} \right) s + \left( \frac{K_i K_b + B_m r}{l J_m} \right) \right]}$$

Ecuación 18

Que realizando algunas simplificaciones se obtiene:

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{K}{(s T_e + 1)(s T_m + 1)} \quad (19)$$

Con:

$$\text{Ganancia estática: } K = \frac{K_i}{B_m r + K_b K_i} \quad (20)$$

$$\text{Cte. tiempo eléctrica: } T_e = \frac{l}{r} \quad (21)$$

$$\text{Cte. tiempo mecánica: } T_m = \frac{J_m r}{B_m r + K_b K_i} \quad (22)$$

Al considerar el diagrama de bloques general se obtiene la función de transferencia (Ecuación 23):

$$\frac{V_p}{\theta_m} = \frac{K_a K_h \left( \frac{K_i / l J_m}{s \left[ s^2 + \left( \frac{r J_m + l B_m}{l J_m} \right) s + \left( \frac{K_i K_b + B_m r}{l J_m} \right) \right]} \right)}{1 + K_a K_h \left( \frac{K_i / l J_m}{s \left[ s^2 + \left( \frac{r J_m + l B_m}{l J_m} \right) s + \left( \frac{K_i K_b + B_m r}{l J_m} \right) \right]} \right)} K_{p2} \cdot n$$

Siendo:

- Ka: Ganancia del amplificador
- Kh: Ganancia del driver
- Ke: Constante elástica del acoplamiento
- Ki: Constante de cupla del motor
- Kb: Constante de fuerza contra electromotriz
- Kp2: Cte. del potenciómetro de realimentación
- n: Cantidad de vueltas del potenciómetro
- Jm: Momento de inercia reflejado en el motor
- Bm: Fricción viscosa reflejada en el motor
- l: Inductancia del motor
- r: Resistencia del motor

Al considerar la relación motor-carga

$$\frac{V_p}{X_c} = \frac{V_p}{\theta_m} \cdot N_{m/c} \quad (24)$$

$$\frac{V_p}{X_c} = \frac{1084103,6842}{(s+14,72)(s+87,32)(s+1,11 \cdot 10^4)} \quad (25)$$

## B6 Simulación con Matlab

Matlab fue utilizado principalmente para realizar los lugares de raíces y diagramas de Bode. Primero se realizó el lugar de raíces para el sistema no compensado para determinar la máxima ganancia aplicable al sistema. Se evidencia la presencia de los dos polos dominantes y un tercer polo muy alejado. Fig.4

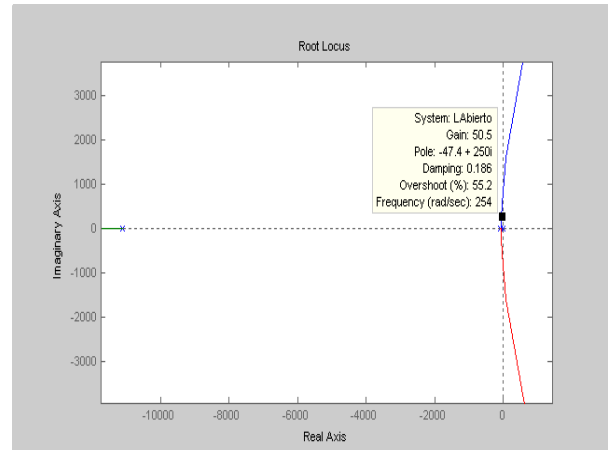


Figura 4

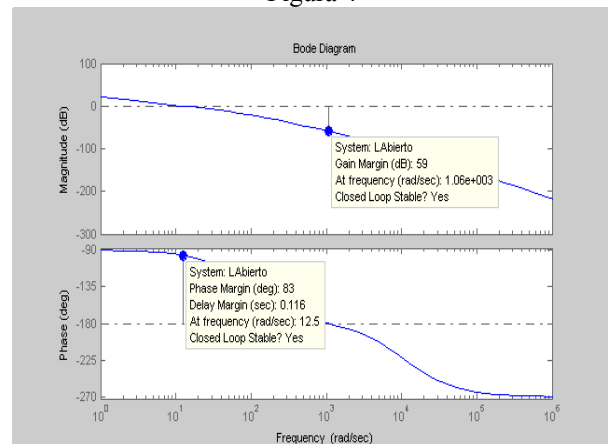


Figura 5

El gráfico de la Fig. 5 es el Bode del sistema. Se observa que el sistema a lazo cerrado será estable ya que se tienen amplios márgenes de fase y de ganancia: 83° y 59 dB, respectivamente. Por lo que el máximo retraso puro de tiempo que se puede añadir al sistema

$$\text{es: } T_d = \frac{M_F \cdot \pi}{180 \cdot \omega_F} = 0.0639s \quad (26)$$

Dado de que el servomotor posee originalmente de fábrica un tacogenerador, es que se decidió efectuar la primera compensación dinámica del lazo proporcionada por el citado sensor. Para ello se trazó con Matlab el contorno de raíces, Fig. 6, y determinaron que con una ganancia del lazo  $K=46$  se obtuviera con la realimentación taquimétrica un sobrepico menor al 3%.

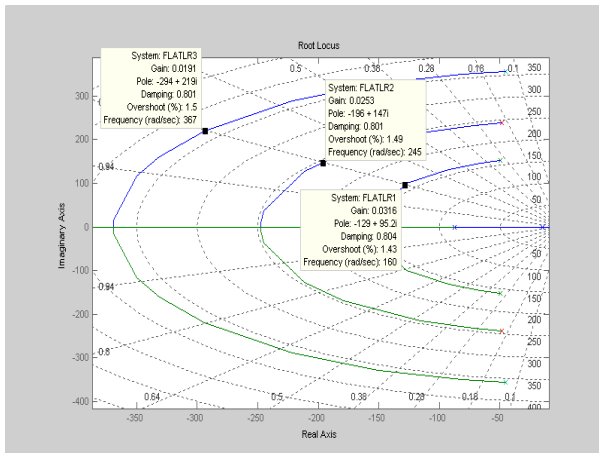


Figura 6

B7 Modelización y simulación en Simulink  
Para modelizar el sistema se utilizó el Simulink ya que dispone de varios bloques preestablecidos que favorecen la representación de ciertas no linealidades de los componentes. Fig.7

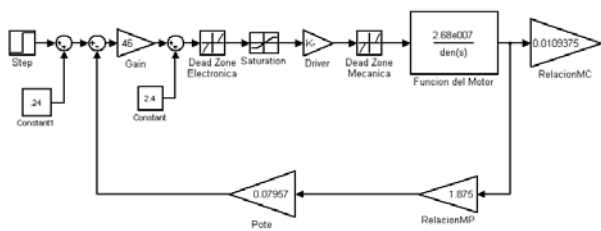


Figura 7

En el modelo se ha incluido:

- Una tensión de entrada fija que evita que la masa salga del rango de trabajo.
- Un amplificador de la señal de error.
- Una zona muerta electrónica definida por las características del driver.
- Su zona de saturación.
- Su ganancia.
- Una zona muerta mecánica propia del motor y la mecánica del banco.
- La función de transferencia del motor.
- La relación de transferencia del movimiento del motor al de la masa y la constante del potenciómetro y su relación de poleas.

Este modelo dió la respuesta al escalón de la figura 9. En ella se puede apreciar que el estado estable en la posición lineal es de 7.6 cm y que posee un sobre impulso del 13.4%. Para la compensación se utilizó el tacogenerador que se modeló como se muestra en la figura 8. Se ha logrado una respuesta mucho mas suave y sin sobre impulso. Fig.10.

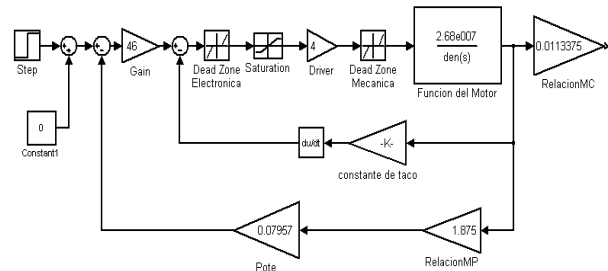


Figura 8

### III OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA TRANSITORIA REAL

#### A. Programa desarrollado

Todo el desarrollo del software y de la recolección de los datos fueron realizadas en una PC con procesador Athlon a 1670 MHz. mediante un puerto paralelo tipo PCI al que se le asignó la dirección de memoria EC02 (hexadecimal)

El programa fue realizado utilizando dos librerías: una de ellas es NTPort que permite el acceso al puerto paralelo en cualquier sistema operativo del tipo Windows; y la otra es Precise Timer que es capaz de medir el tiempo en microsegundos.

( [www.codeproject.com](http://www.codeproject.com) ) que utiliza dos funciones de Windows API:

QueryPerformanceFrequency()  
QueryPerformanceCounter()

Las mismas son para obtener la frecuencia y el conteo del contador de alta resolución. Ambas librerías fueron unidas en un programa basado en diálogos que consta de dos secciones: una para capturar los datos del encoder mediante lecturas del puerto paralelo, a las que le asigna un instante de lectura, para posteriormente almacenar ambos datos en un archivo binario. La otra parte del programa es la que realiza la gráfica, esta toma el archivo previamente generado y lo analiza obteniendo el máximo sobre impulso y el tiempo de dicha lectura para dimensionar automáticamente un gráfico en pantalla completa de la respuesta temporal.

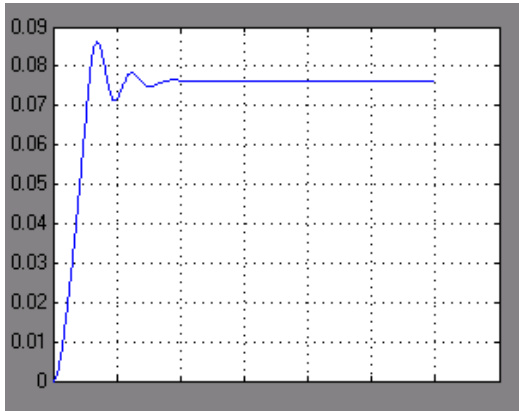


Figura 9

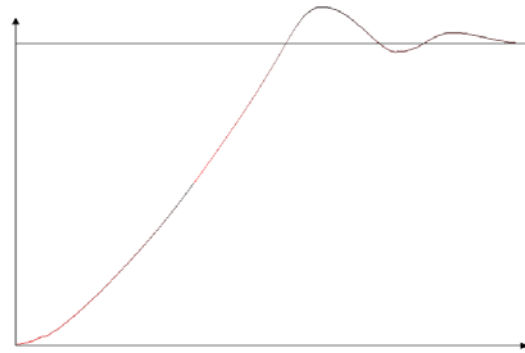


Figura 11

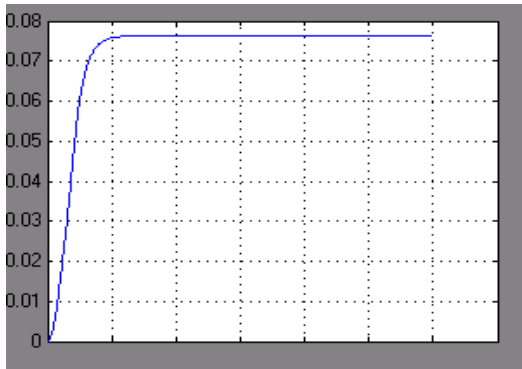


Figura 10

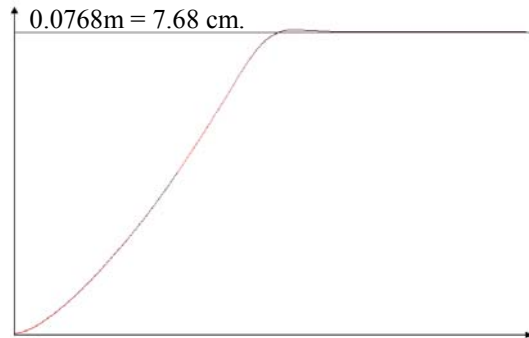


Figura 12

#### B Respuestas transitorias capturadas

En la fig. 11 se expone la respuesta transitoria del sistema sin compensar captada desde el puerto paralelo por el programa escrito en VC++.

El sobrepico es del 12 % con 1525 pulsos. La simulación dió un valor del 13.4 %.

La fig. 12 exhibe el transitorio del sistema compensado por el tacogenerador.

Se observa una adecuada correlación entre los valores experimentales obtenidos de la captura real con los presentados por las simulaciones en Simulink. En cuanto a la repetibilidad y resolución del banco analógico, se tiene que luego de 10 muestras el posicionamiento medio fue de 7,684 cm. (las simulaciones dieron 7,6 cm.). El error estadístico promedio obtenido mediante el programa Excel es de 0,477 mm.

#### IV CONCLUSIONES

El banco analógico con captura digital de la posición es un elemento básico para la experimentación en investigación y desarrollo, y el entrenamiento didáctico.

En Marzo ppdo. se realizó una demostración teórica-práctica en la Cátedra de Sistemas de Control I de la Facultad de C.E.F. y N. de la Universidad Nacional de Córdoba. Próximamente se harán también demostraciones en la Facultad Regional Córdoba de la UTN. Se destaca la participación activa de los estudiantes de grado y el apoyo de las empresas Mpymes de Córdoba.

#### V AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las indicaciones y sugerencias del Prof. Ing. Ladislao Mathé titular de la cátedra de Sistemas de Control I de la Facultad de C.E.F. y N. de la Universidad Nacional de Córdoba.

#### VI REFERENCIAS

- Apóstoli, R. S. Principios de Control Automático. UTN Córdoba. *Apuntes sobre Contorno de Raíces*. (1983).
- Apóstoli, R. S; Mármol, A.; Artola, G. : *"Desarrollo de un ambiente docente e investigativo en servocontrol digital para robótica experimental"* Congreso CACIC .El Calafate. Patagonia. (2001)
- Kuo. B. : *"Sistemas de Control automático"*. Prentice Hall. (1996).