

Prototipo educativo basado en un servomotor analógico de Radio Control

Jessica J. Maldonado, Rubén Garrido *

* CINVESTAV, Av. IPN No. 2508 CP 07360, Ciudad de México,
México (e-mail:
jmalonado@ctrl.cinvestav.mx, garrido@ctrl.cinvestav.mx).

Resumen: Este artículo presenta la puesta en funcionamiento de un prototipo de laboratorio basado en un servomotor analógico de Radio Control (SARC) con un costo menor a \$900.00 MXP. Se describe el proceso de construcción del prototipo así como su empleo en la prueba de algoritmos de control e identificación paramétrica clásicos incluyendo la ley de control Proporcional Integral Derivativa (PID), el algoritmo de Mínimos Cuadrados (MC) y un observador de Luenberger. Estos experimentos muestran su potencial para la enseñanza en las áreas del Control Automático, la Mecatrónica y la Robótica.

Keywords: Prototipo de laboratorio, servomotor, Control PID, identificación de parámetros, observador de estados, servomotor.

1. INTRODUCTION

Uno de los aspectos importantes en la enseñanza del Control Automático, de la Mecatrónica y de la Robótica es la evaluación de algoritmos de control utilizando un prototipo de laboratorio. Esta actividad complementa las evaluaciones realizadas mediante simulaciones numéricas y permite apreciar aspectos no previstos en éstas tales como dinámicas no modeladas, perturbaciones, incertidumbres, ruidos de medición, problemas en la implementación digital de los algoritmos, entre otros. Los motores de Corriente Directa (CD) son ampliamente usados dentro de prototipos orientados a la enseñanza. Entre sus ventajas cabe mencionar que su dinámica se describe razonablemente bien por modelos lineales sencillos y que la etapa de electrónica de potencia requerida para alimentarlos es de fácil implementación. Además, constituyen un componente importante dentro de sistemas electromecánicos tales como robots manipuladores, máquinas herramientas, y en su versión sin escobillas forman parte del tren motriz de automóviles híbridos y eléctricos. Existen varios prototipos comerciales o propuestos en la literatura basados en motores de CD que son adecuados para la enseñanza [Apkarian and Astrom (2004), René van de Molengraft and de Kraker (2005), Bernstein (2005), Gunasekaran and Potluri (2012), Reck and Sreenivas (2015)]. Sin embargo, un problema que enfrentan las instituciones de enseñanza para su adquisición es el costo elevado que los prototipos comerciales pueden tener. Aunado a lo anterior es el hecho de que es necesaria la compra de más de un prototipo para la realización simultánea de experimentos por varios estudiantes.

Los servomotores analógicos de Radio Control (SARC) se usan ampliamente en la construcción de prototipos para la enseñanza incluyendo robots manipuladores, robots bípedos y robots móviles. Su bajo precio y la facilidad con la que pueden controlarse constituyen dos factores que los hacen atractivos para este fin [Bishop et al. (2006)]. Este

tipo de dispositivos se encuentran constituidos por un motor de CD, un tren de engranes, un potenciómetro acoplado mecánicamente al eje de salida del tren de engranes y un circuito de control el cual incluye un amplificador de potencia. Estos componentes forman un sistema en lazo cerrado en donde la referencia está especificada por medio de una señal de ancho de pulso variable. De acuerdo con [Onate and Molina (2014)] la ley de control empleada en los SARC es de tipo proporcional y su valor es fijo y sin posibilidad de modificar. Para utilizar algoritmos de control Proporcional Integral Derivativo (PID), en [Benke and Schreiber (2006)] se desconecta el potenciómetro del lazo de realimentación manteniéndose la tarjeta de control. Un microprocesador externo utiliza la señal del potenciómetro para alimentar una ley de control PID; la salida de esta última se convierte a una señal de ancho de pulso la cual alimenta a la tarjeta de control del servomotor. En [Khan et al. (2016)] se remueve completamente el circuito de control dejando únicamente el motor, la caja de engranes y el potenciómetro. Un microprocesador externo permite implementar una ley de control PID y varios algoritmos de identificación basados en modelos autorregresivos exógenos.

El objetivo de este trabajo es presentar la puesta en funcionamiento de un prototipo basado en un servomotor analógico de Radio Control (SARC). Al igual que en [Khan et al. (2016)], se remueve completamente la tarjeta de control manteniéndose el motor de CD, el tren de engranes y el potenciómetro; la amplificación de potencia se realiza mediante un amplificador lineal operacional de potencia externo y la ley de control se implementa en una computadora personal. Una diferencia importante con las referencias antes mencionadas es el hecho de que en el prototipo desarrollado se toma explícitamente en cuenta el ruido de medición en la señal proporcionada por el potenciómetro. Además, la identificación paramétrica se realiza empleando un modelo del motor de CD descrito



Figura 1. Servomotor HS-485HB.

en los libros de texto. Por otro lado, las ventajas en el empleo de SARC son su bajo costo, amplia disponibilidad y el hecho de que el prototipo puede describirse razonablemente por un modelo lineal lo cual lo hace adecuado en cursos básicos o intermedios en Control Automático, Mecatrónica y Robótica. El prototipo se evalúa mediante la implementación de algoritmos clásicos tanto de control en lazo cerrado, de identificación paramétrica y de observación de estados.

El artículo se divide de la manera siguiente. En la Sección 2 se describen las características de un servomotor analógico de Radio Control y su modificación. La Sección 3 da detalles sobre los circuitos electrónicos que se emplean en la plataforma experimental para controlar al servomotor. Los experimentos realizados con el prototipo se muestran en la Sección 4. El trabajo termina con algunas conclusiones y describe el trabajo futuro.

2. SERVOMOTOR ANALÓGICO DE RADIO CONTROL Y SU MODIFICACIÓN

El HS-485HB visto en la Fig. 1 es un servomotor creado por la empresa Hi-Tec cuyas características técnicas se muestran en la Tabla 1. La Fig. 2 muestra al servomotor

Voltaje operativo	4.8V - 6.0V
Velocidad (a 60°)	0.22 - 0.18 segundos
Rango del par (kg/cm)	4.8 - 6.0
Rango de movimiento	180°

Tabla 1. Características técnicas del servomotor HS-485HB.

y su tarjeta de control. La separación de la tarjeta de control del servomotor y los nuevos cables que alimentan al motor de CD y que permiten conectar al potenciómetro se muestran en la Fig. 3.



Figura 2. Servomotor y su tarjeta de control.

3. CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

Los materiales que se necesitan para elaborar la etapa de electrónica de potencia se observan en la Tabla 2 junto

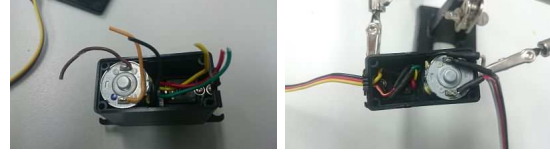


Figura 3. Servomotor sin su tarjeta de control y servomotor modificado.

con su precio en pesos mexicanos y el costo total del prototipo incluyendo el costo del servomotor.

Material	Precio
Servomotor HS-485HB	\$400
Carga metálica para el servomotor	\$100
Amplificador LM675	\$188
Resistencias en el circuito del amplificador	\$7
Diodos	\$2
Capacitores 4.7 μ F	\$6
Capacitores 1000 μ F	\$18
Capacitores 0.1 μ F	\$7
Capacitores 220 nF	\$4
LED rojo y verde	\$10
Placa perforada	\$20

Tabla 2. Tabla de materiales.

El precio total del prototipo es de \$742. Si se incluye un circuito para filtrar la señal de salida el precio total sería de \$800 y aún el costo sería menor a \$900.

3.1 Circuito amplificador de potencia

El componente principal de este circuito es un amplificador de potencia lineal National Semiconductor modelo LM675 [National-Instruments (2013)]. La Fig. 4 muestra el diagram del circuito amplificador de potencia.

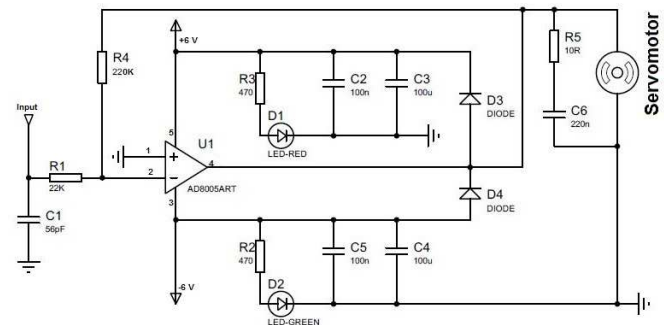


Figura 4. Circuito amplificador de potencia.

La elección de un circuito de amplificación lineal estriba en su posibilidad de recibir señales de voltaje de una tarjeta de adquisición de datos dotada de convertidores Digital-Analógicos. Por otro lado, la disipación de potencia no es elevada en esta aplicación; el motor de CD consume menos de 1A. La Fig. 5 muestra el circuito impreso correspondiente al amplificador de potencia y la Fig. 6 muestra el prototipo construido en donde se observa una inercia metálica agregada al motor.

3.2 Filtrado de la señal del potenciómetro.

Se emplea un filtro pasabajos con una frecuencia de corte de 30 Hz para reducir el ruido de medición producido



Figura 5. Vista del circuito impreso del amplificador de potencia con sus componentes montados.



Figura 6. Vista del prototipo.

por el potenciómetro. El amplificador operacional evita la interacción entre el potenciómetro y el filtro. La Fig.

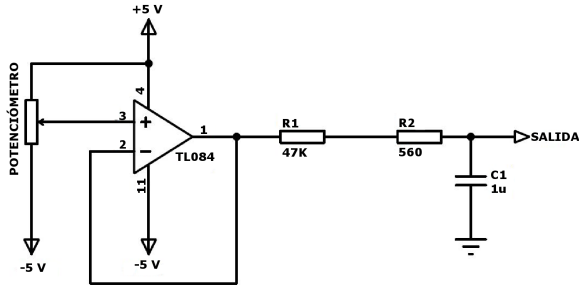


Figura 7. Filtro pasabajos empleado para atenuar el ruido de medición producido en el potenciómetro.

8 muestra la salida de voltaje del potenciómetro antes y después del filtrado. Se puede apreciar que el potenciómetro produce niveles elevados de ruido de medición y que el filtro los atenúa apreciablemente.

4. EXPERIMENTOS.

4.1 Plataforma de experimentación.

Para probar el prototipo se emplea una computadora personal dotada de una tarjeta de adquisición de datos Sensoray modelo 626. Los algoritmos de control e identificación se codificaron en MatLab/Simulink de Mathworks y se ejecutaron mediante el ambiente de control en tiempo real QUARC de Quanser Consulting. El periodo de muestreo es de 1 ms y el algoritmo de integración corresponde al método Euler01.

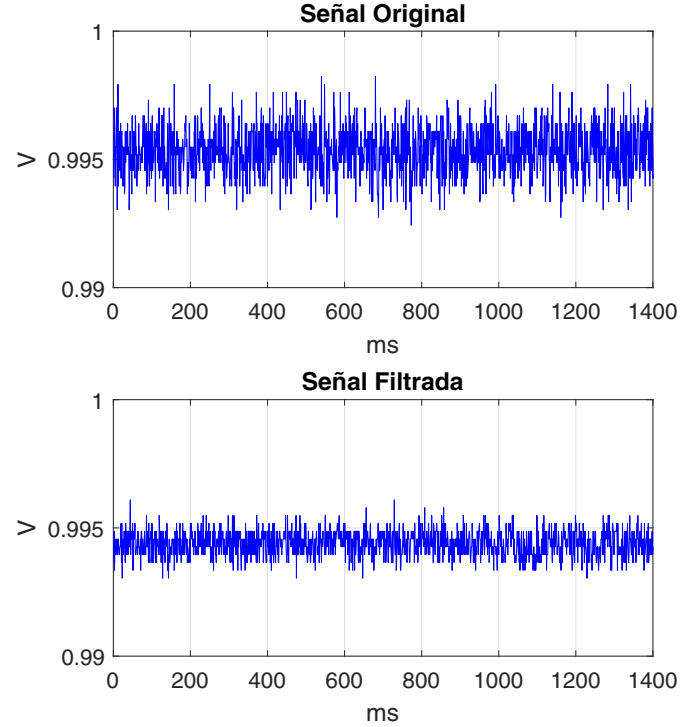


Figura 8. Señales del potenciómetro original y filtrada.

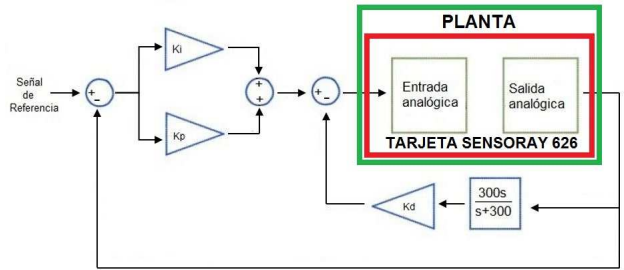


Figura 9. Diagrama de Bloques del algoritmo PID.

4.2 Algoritmo de control PID.

La ley de control PID se describe mediante la siguiente expresión en el dominio del tiempo [Kiam Heong Ang and Li (2005), Astrom and Hagglund (1995)].

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau - K_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (1)$$

Siendo K_p la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral y K_d la ganancia derivativa. La variable y corresponde a la posición del motor de CD y el error de posición se define como $e = r - y$ donde r es la referencia. Notar que en la acción derivativa se utiliza la derivada de la salida y en lugar de la derivada de la señal del error para evitar sobretiros al aplicarse una señal de referencia con derivada temporal elevada. La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques correspondiente a esta ley de control para su implementación en tiempo real. Un filtro pasa altas produce estimados de la derivada de la posición y del eje del motor de CD.

En la Fig. 10 se observa el comportamiento de la salida del prototipo ante una entrada escalón filtrada utilizando las

ganancias $K_p = 1, K_d = 0,05$ y $K_i = 0,45$. Se observa en la gráfica que la señal proveniente de la medición se iguala a la referencia después de 0.8 segundos y aparentemente sin error en estado estacionario. La Fig. 11 muestra la

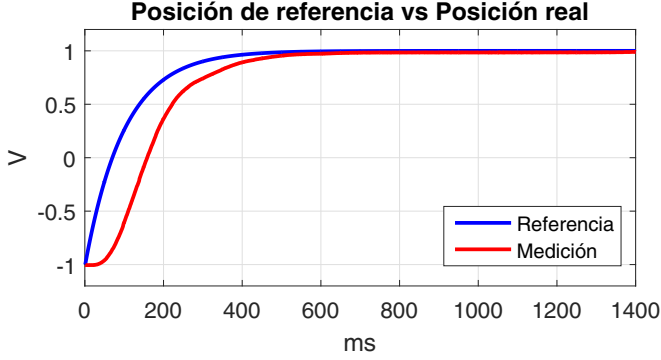


Figura 10. Posición de referencia vs Posición medida usando el algoritmo PID con $K_p = 1, K_d = 0,05$ y $K_i = 0,45$.

señal de control correspondiente. Es interesante notar que la señal no presenta castaño excesivo lo cual indica que el filtrado analógico pasabajas aplicado a la señal del potenciómetro atenúa el ruido de medición a niveles adecuados.

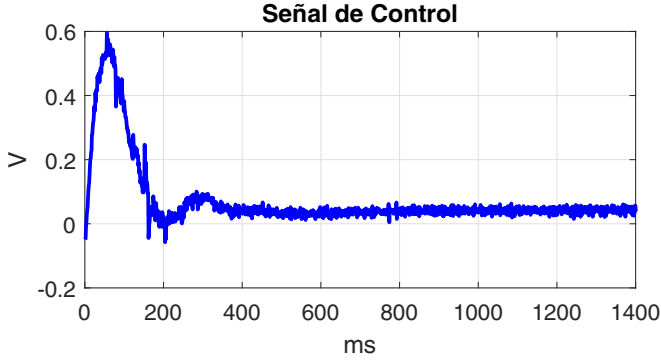


Figura 11. Señal de control usando el algoritmo PID con $K_p = 1, K_d = 0,05$ y $K_i = 0,45$.

4.3 Identificación de parámetros

Para propósitos de identificación paramétrica se utiliza un modelo lineal de segundo orden (2) adecuado para diseñar leyes de control aplicadas a motores de CD.

$$\ddot{y} + a\dot{y} = bu \quad (2)$$

en donde a y b son parámetros positivos. Este modelo no es exponencialmente estable por tener un polo en el origen y por esta razón la identificación de parámetros se realiza en lazo cerrado. Para este fin se utiliza el controlador PID mencionado en la subsección anterior con el fin de estabilizar al motor de CD y se utilizan mediciones de u y y para realizar la estimación de los parámetros a y b (ver Fig. 12).

Aplicando la transformada de Laplace al modelo (2) se obtiene

$$s^2Y(s) + asY(s) = bU(s) \quad (3)$$

en donde $Y(s) = \mathcal{L}\{y\}$, $U(s) = \mathcal{L}\{u\}$ y $\mathcal{L}\{\bullet\}$ corresponde a la transformada de Laplace.

Para aplicar el método de Mínimos Cuadrados utilizando (2) para construir un regresor serían necesarias mediciones de la velocidad \dot{y} y de la aceleración \ddot{y} las cuales no están disponibles siendo además la posición y y la señal de control u las únicas señales disponibles. Para resolver este problema se recurre al uso de filtros de estado [Sastry and Bodson (1989)] para obtener una expresión que contenga los parámetros desconocidos pero esta vez asociados a señales disponibles.

Defínase el filtro

$$F(s) = \frac{f_2}{s^2 + f_1s + f_2} \quad (4)$$

con f_1 y f_2 reales positivos. Multiplicando ambos miembros de (3) por $F(s)$ permite obtener.

$$F(s)s^2Y(s) + aF(s)sY(s) = bF(s)U(s) \quad (5)$$

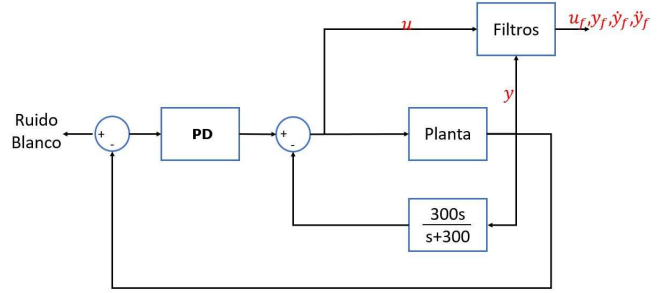


Figura 12. Identificación en lazo cerrado del prototipo.

Considérense las definiciones siguientes

$$Y_f(s) = F(s)Y(s) \quad (6)$$

$$sY_f(s) = F(s)sY(s) \quad (7)$$

$$s^2Y_f(s) = F(s)s^2Y(s) \quad (8)$$

$$U_f(s) = F(s)U(s) \quad (9)$$

Lo anterior permite reescribir (5) como

$$s^2Y_f(s) + asY_f(s) = bU_f(s) \quad (10)$$

Finalmente, la expresión temporal para (10) es la siguiente

$$\ddot{y}_f + a\dot{y}_f = bu_f \quad (11)$$

en donde $\ddot{y}_f = \mathcal{L}^{-1}\{s^2Y_f(s)\}$, $\dot{y}_f = \mathcal{L}^{-1}\{sY_f(s)\}$ y $u_f = \mathcal{L}^{-1}\{U_f(s)\}$ son las versiones filtradas de la aceleración \ddot{y} , la velocidad \dot{y} y la señal de control u respectivamente. Los filtros que permiten obtener estas variables se describen a continuación

$$\begin{aligned} y &\rightarrow \frac{f_2s^2}{s^2 + f_1s + f_2} \rightarrow \ddot{y}_f \\ y &\rightarrow \frac{f_2s}{s^2 + f_1s + f_2} \rightarrow \dot{y}_f \\ u &\rightarrow \frac{f_2}{s^2 + f_1s + f_2} \rightarrow u_f \end{aligned} \quad (12)$$

y están basados en el filtro (4). Notar que sólo es necesario el empleo de mediciones de la posición y y de la entrada u para obtener las variables \ddot{y}_f , \dot{y}_f y u_f . Para aplicar

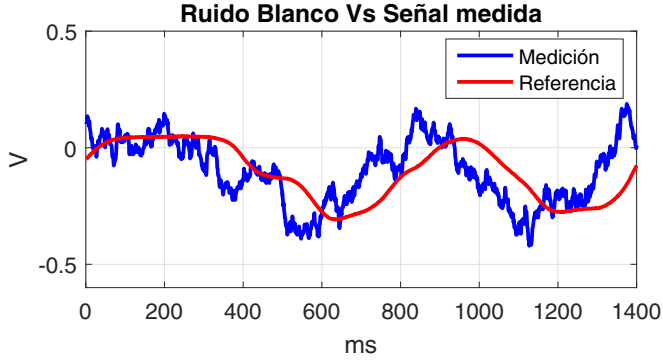


Figura 13. Señal de referencia en posición aplicada al prototipo y señal de posición medida.

el método de Mínimos Cuadrados es necesario reescribir (11) de la manera siguiente

$$z(t) = \phi(t)^T \theta \quad (13)$$

$$z(t) = \ddot{y}_f \quad (14)$$

$$\phi(t) = [-\dot{y}_f, u_f]^T \quad (15)$$

$$\theta = [a, b]^T \quad (16)$$

La ecuación (13) también es válida en los instantes de tiempo $t = T, 2T, \dots, (K-1)T, KT, \dots$ donde T corresponde a un periodo de muestreo. Lo anterior permite escribirla como

$$z(K) = \phi(K)^T \theta \quad (17)$$

Para aplicar el método de Mínimos Cuadrados se utiliza una señal de referencia de riqueza espectral amplia, en este caso ruido blanco como se muestra en la Fig. 12. Posteriormente se captura en tiempo real los valores del vector $\phi(K)$ y de $z(K)$ en diferentes instantes de tiempo para formar los términos siguientes

$$A = \begin{bmatrix} \phi(1)^T \\ \phi(2)^T \\ \vdots \\ \phi(K-1)^T \\ \phi(K)^T \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ \vdots \\ z(K-1) \\ z(K) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Finalmente, el estimado $\hat{\theta}$ de θ está dado por [Isermann and Münchhof (2010)]

$$\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (19)$$

Se utilizaron $K=200$ muestras tomadas con un periodo de muestreo de $T=50\text{ms}$. Se utilizó como señal de excitación Ruido Blanco Filtrado de MatLab/Simulink (ver Fig. 13). Los estimados obtenidos fueron $\hat{a} = 9,1202$ y $\hat{b} = 249,2089$.

4.4 Observador de estados.

La forma de estado de la dinámica (2) corresponde a las ecuaciones siguientes

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -ax_2 + bu \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Los estimados $\hat{a} = 9,1202$ y $\hat{b} = 249,2089$ obtenidos previamente se emplean en la construcción del observador de estados siguiente

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + k_{o1}(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\hat{a}\hat{x}_2 + \hat{b}u + k_{o2}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= \hat{x}_1 \end{aligned} \quad (21)$$

Para evaluar al observador se utilizan las ganancias $k_{o1}=312.5884$ y $k_{o2}=716.7802$ y se considera la siguiente ley de control PID alimentada por los estimados obtenidos mediante el observador

$$U(t) = K_p \hat{e}(t) + K_i \int_0^t \hat{e}(\tau) d\tau - K_d \hat{x}_2 \quad (22)$$

donde $\hat{e} = r - \hat{x}_1$. Se emplean las mismas ganancias

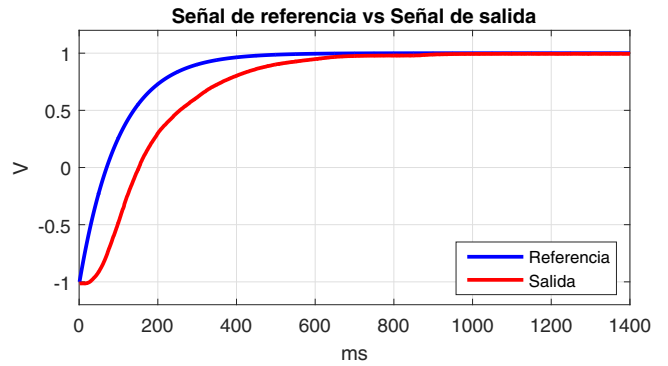


Figura 14. Posición de referencia vs Posición medida usando el algoritmo PID con realimentación de estados estimados mediante un observador con $K_p = 1, K_d = 0,05$ y $K_i = 0,45$.

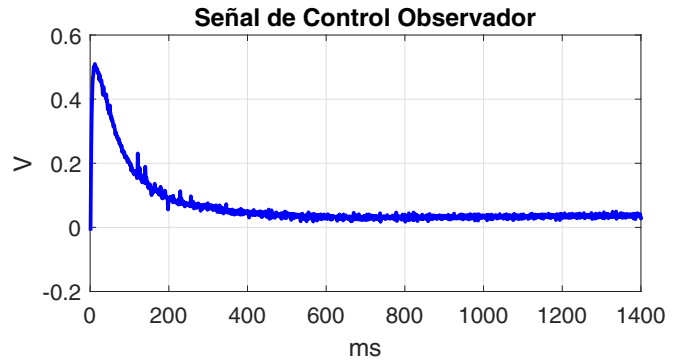


Figura 15. Señal de control usando el algoritmo PID con realimentación de estados estimados mediante un observador con $K_p = 1, K_d = 0,05$ y $K_i = 0,45$.

que aquellas utilizadas en la ley de control (1). La Fig. 14 muestra la respuesta del prototipo en lazo cerrado con la ley de control (22). La señal de control correspondiente se muestra en la Fig. 15. También se muestra en la Fig. 16 la evolución temporal del error de observación. Puede observarse que la señal generada mediante la ley de control (22) alimentada con los estimados producidos por el observador presenta menos oscilaciones que la señal de control generada por el controlador (1). Además, lo anterior también indica que los estimados de los parámetros a y b utilizados en el observador conllevan a

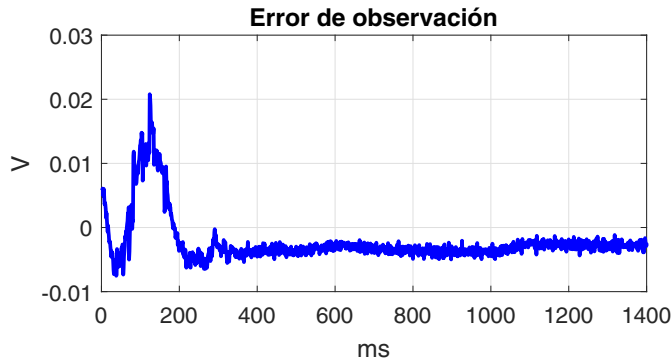


Figura 16. Error de observación

una estimación razonable de la velocidad y de la posición angulares del prototipo.

5. CONCLUSION

Este trabajo describe el diseño y construcción de un prototipo de laboratorio de bajo costo basado en modificaciones a un servomotor analógico de Radio Control. El empleo de estos servomotores permite una reducción en el costo del prototipo y en el tiempo de su puesta en funcionamiento. Además, el tamaño reducido del prototipo hace posible tener varios ejemplares en un laboratorio o salón de clases. La realización de experimentos en éste facilita a los estudiante llevar conocimientos teóricos a la práctica de una forma sencilla. Por otro lado, a los profesores les facilita ilustrar el funcionamiento de leyes de control en donde los aspectos de ruido de medición, adquisición de datos, perturbaciones y dinámicas no modeladas suceden en un entorno controlado.

Los experimentos reportados muestran un desempeño adecuado con leyes de control PID, sean alimentadas con estimados de la velocidad obtenidos mediante un filtro, o bien mediante un observador de estados. Los experimentos relativos a la identificación paramétrica indican que el Método de Mínimos Cuadrados permite estimar un modelo lineal simple del prototipo y que la calidad del modelo estimado se refleja en una estimación adecuada de su posición y su velocidad angulares. Estos resultados muestran que el prototipo desarrollado tiene potencial como herramienta de enseñanza en las áreas de Control Automático, Mecatrónica y Robótica. Como trabajo futuro se pretende la puesta en funcionamiento de leyes de control avanzadas incluyendo Control Adaptable y Control por Rechazo Activo de Perturbaciones. También se explorará el empleo de una tarjeta Arduino para adquisición de datos y la implementación de las leyes de control utilizando *software* libre. Otra vertiente a examinar es la posibilidad de que los estudiantes construyan el prototipo como parte de su formación.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Gerardo Castro Zavala y Jesús Meza Serrano en la construcción del prototipo. Se agradece el apoyo brindado por CONACYT al primer autor mediante una beca doctoral.

REFERENCIAS

- Apkarian, J. and Astrom, K. (2004). A laptop servo for control education. *IEEE control systems*, 24, 70–73.
- Astrom, K. and Hagglund, T. (1995). *PID Controllers*. Instrument Society of America.
- Benke, S. and Schreiber, M. (2006). Digital position control for analog servos. In *International Conference on Humanoid Robots*, 56–61. IEEE.
- Bernstein, D.S. (2005). The quanser dc motor control trainer. *IEEE Control Systems Magazine*, 3, 90–93.
- Bishop, B.E., Piepmeyer, J.A., Piper, G., and Knowles, K.A. (2006). Low-cost robotic laboratory exercises and projects. *International Journal of Engineering Education*, 22(4), 723.
- Gunasekaran, M. and Potluri, R. (2012). Low-cost undergraduate control systems experiments using microcontroller-based control of a dc motor. *IEEE Transactions on Education*, 55, 508–516.
- Isermann, R. and Münchhof, M. (2010). *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing Series. Springer Berlin Heidelberg.
- Khan, S., Paul, A., Sil, T., Basu, A., Tiwari, R., Mukherjee, S., Mondal, U., and Sengupta, A. (2016). Position control of a dc motor system for tracking periodic reference inputs in a data driven paradigm. In *Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), International Conference on*, 17–21. IEEE.
- Kiam Heong Ang, G.C. and Li, Y. (2005). Pid control system analysis, design and technology. *IEEE Transactions on control systems technology*, 559–576.
- National-Instruments (2013). Lm675 power operational amplifier. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm675.pdf>. Accessed: 2017-04-04.
- Onate, C.U. and Molina, J.K. (2014). Characterization, simulation and implementation of a new dynamic model for a dc servomotor. *IEEE Latin America Transactions*, 12(6), 997–1004.
- Reck, R.M. and Sreenivas, R.S. (2015). Developing a new affordable dc motor laboratory kit for an existing undergraduate controls course. In *American Control Conference (ACC), 2015*, 2801–2806. IEEE.
- René van de Molengraft, M.S. and de Kraker, B. (2005). Integrating experimentation into control courses. *IEEE Control Systems Magazine*, 25, 40–44.
- Sastry, S. and Bodson, M. (1989). *Adaptive control: stability, convergence and robustness*. Prentice Hall.