

Position Control of an Electrohydraulic System by a Single Board Computer for Control Education

Edgar H. Robles, Felipe J. Torres*, Ana C. Negrete, Jesús E. Martínez
Diego A. Núñez, Raúl Rivera

*División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, C.P. 36880
Salamanca, Guanajuato, México*

**corresponding author, e-mail: fdj.torres@ugto.mx*

Abstract: This work presents the experimental development of the position control of a mechatronic system composed of a double acting hydraulic cylinder driven by a 4/2 solenoid valve with spring return through a single board computer and instrumentation with feedback loop. The low-cost experimental platform for the control implementation has been integrated through the use of a Raspberry Pi minicomputer, programmed with Python language that executes the control actions and obtains the position measurement data of the rod end through an infrared distance sensor and an analog-to-digital converter. Classical control schemes based on PWM signal manipulation have been experimentally tested to control the solenoid valve excitation. The results verify the widely known theoretical understanding of the impact of proportional, derivative, and integral gains of a PID controller. In addition, the experimental platform setup allows for laboratory practices of control systems courses in engineering education.

Keywords: mechatronic system, computers for control, classic control, control education, low-cost tool.

1. INTRODUCCIÓN

El control de sistemas mecatrónicos ha sido un área de investigación y desarrollo tecnológico en constante evolución y que hace uso de las nuevas tecnologías de cómputo, tanto de hardware como de software, para lograr mayor eficiencia en el desempeño y en la relación costo-beneficio. En este sentido, los sistemas de bajo costo están siendo implementados con mayor frecuencia en aplicaciones de control que comúnmente se realiza a través de equipo de gran capacidad computacional, esto debido principalmente a los requerimientos del software para el cálculo numérico, obtención y el almacenamiento de datos de instrumentación, entre otros argumentos.

Por otro lado, uno de los sistemas mecatrónicos ampliamente usado en la industria es el sistema electrohidráulico, conformado por un equipo de suministro de potencia hidráulica, válvula solenoide de control y el actuador final, un cilindro hidráulico de doble efecto. El elemento de control es la válvula solenoide, por lo que es de suma importancia identificar el tipo de electroválvula para conocer su funcionamiento y la consecuencia de su conmutación en el cilindro. De manera generalizada, para un cilindro hidráulico de doble efecto se utiliza una válvula 4/2 (4 vías y 2 posiciones) o una válvula 4/3 (4 vías, 3 posiciones). La válvula 4/2 emplea 1 solenoide para cambiar a la posición de avance; cuando este se desenergiza, el efecto del resorte causa que la válvula regrese a su posición inicial, provocando el retroceso

del cilindro. La válvula 4/3, contiene 2 solenoides, donde cada uno de ellos provoca el avance o el regreso, según corresponda, pero al quitar la señal de voltaje en el solenoide, la válvula regresa a su posición central que puede ser de tipo bloqueada, entre otras.

Así, el control de un sistema electrohidráulico ha sido tópico de investigación desde hace décadas, por ejemplo, Mihajlov et al. (2002) aplica control por modos deslizantes para el seguimiento de trayectoria de un cilindro de doble efecto, mientras Milić et al. (2010) utiliza control robusto H_∞ . Sin embargo, en los últimos años se ha retomado un auge en estos sistemas de control, como en Tony Thomas et al. (2022) donde comparan experimentalmente el desempeño de controlador PID respecto a un control por modos deslizantes; manipulan una señal PWM desde una computadora personal a través de un driver inteligente y, además, requiere de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments. Won et al. (2020) diseña un control no lineal para el seguimiento de posición de un sistema electrohidráulico teniendo disponible solo la posición del cilindro como retroalimentación; el esquema de experimentación que usaron se compone de una computadora personal, convertidor digital-analógico (DAC) y analógico-digital (ADC) de 12 bits, bajo el sistema de automatización extendida TwinCAT3. Wang et al. (2021) prueba experimentalmente el control de posición de un cilindro asimétrico (1 solo vástago) electrohidráulico con rechazo a disturbios a través del diseño de un controlador de

realimentación de la salida y un observador de alta ganancia; la plataforma experimental consistió de una placa base industrial Advantech 610L en conjunto con una computadora personal, donde se ejecuta el ambiente en tiempo real de MATLAB/Simulink, y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments DAC y ADC de 16 bits. Shen y Shen (2021) diseñan un control backstepping de tiempo finito combinado con un observador de estado extendido para controlar la posición de un servomecanismo electrohidráulico; los resultados experimentales que presentan fueron obtenidos por medio de una computadora industrial y un módulo de acondicionamiento de señales. Es importante destacar que en todos los trabajos que se han señalado, se utiliza una electroválvula 4/3 de posición central bloqueada, además, de ser evidente el uso de equipo de cómputo de gran capacidad de hardware y tarjetas de adquisición de datos que complementan el montaje de experimentación.

En relación con el uso de minicomputadora para implementación de sistemas de control, en Ramchandra et al. (2019) construyen un sistema de bajo costo para controlar la posición vertical de un robot auto balanceado por medio de una Raspberry Pi (RPi) y hacen uso de un giroscopio/acelerómetro ITG3200/ADXL345 para cerrar el lazo de control. En Škraba et al. (2020) desarrollan un kit de sistema de control de un motor de CD, basado en la manipulación del ancho de pulso (PWM), para el estudio del controlador PID a través de Arduino UNO y RPi 3B, programado en JavaScript. Karim y Thamrin (2022) sintoniza un controlador PID en Matlab/Simulink para controlar un brazo robótico de 6 grados de libertad, luego se implementa el controlador en una RPi por medio de lenguaje Python para conducir un servodriver PCA9685 con el cual se manipula a los servomotores; por último, se construye una interfaz gráfica de usuario para introducir los valores de posición angular de referencia, sin embargo, el sistema de control es en lazo abierto.

El objetivo de este trabajo es construir y probar una plataforma experimental de bajo costo que sirva como equipo para la educación de la ingeniería, la cual permita controlar la posición de un cilindro de doble efecto, conducido por una electroválvula 4/2 con restitución por resorte, por medio de una minicomputadora Raspberry Pi, codificada en lenguaje Python para la implementación del control en lazo cerrado, basado en manipulación de señal PWM y con almacenamiento de datos obtenidos por el sensor infrarrojo de distancia Sharp GP2Y0A21.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la descripción general de los componentes usados, en la sección 3 se describe la metodología realizada, en la sección 4 se muestran los resultados de la experimentación y en la sección 5 se dan las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE COMPONENTES

2.1 Sistema electrohidráulico

Un sistema electrohidráulico, como el mostrado en la Fig. 1, consiste de un equipo de suministro de potencia hidráulica (0Z) compuesto por la bomba hidráulica, motor eléctrico, válvula reguladora de presión, manómetro y tanque; una válvula de control principal (1V1), la cual en este trabajo se trata de una electroválvula de 4 vías y 2 posiciones (4/2) actuada por electroimán y restituida por resorte; por último, el elemento de actuación final, el cilindro de doble efecto sin émbolo magnético ni resorte de restitución interno.

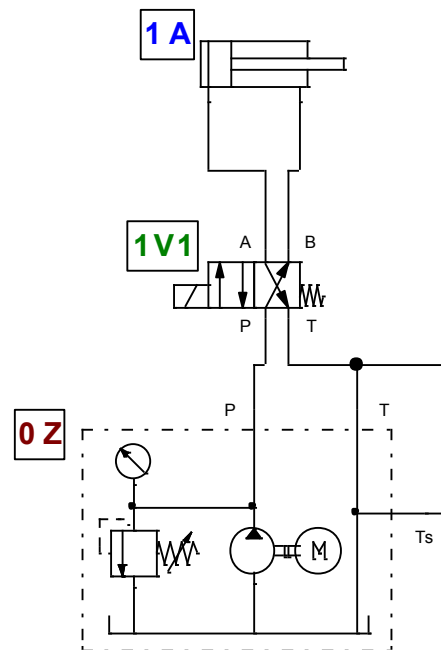


Fig. 1. Sistema electrohidráulico.

Notar la importancia del tipo de electroválvula usada, una electroválvula 4/2 con electroimán y restitución por resorte requiere mantener la excitación del electroimán durante el tiempo que se necesite para que el cilindro avance, alimentando con una señal de 24 V CD. Una vez que el electroimán sea desenergizado, el efecto del resorte de la válvula hará que esta conmute a su posición inicial, lo cual causará que el cilindro de doble efecto sea retraído. Así, para lograr una posición deseada del cilindro y que ahí permanezca, es necesario conmutar periódicamente a la electroválvula.

2.2 Raspberry Pi

La Raspberry Pi es descrita como una minicomputadora de placa única, de manera análoga sería el CPU de una computadora de escritorio. El tamaño de la RPi es similar al de una tarjeta bancaria, a la que se conectan los periféricos

como el monitor, teclado y *mouse*. El sistema operativo recomendado por la Fundación Raspberry es Raspbian, basado en Debian bajo el ambiente Linux, por tanto, se incluye *software open-source*, como Python y ambientes de desarrollo como Thonny.

En este trabajo se ha utilizado una Raspberry Pi modelo 3B+, con 2 GB de memoria RAM y, se programa en lenguaje Python para el manejo de los pines de Entrada/Salida de propósito general (GPIO), a través de los cuales se configura la comunicación serial con el convertidor analógico digital (ADC) ADS1115 y se envía la señal PWM al circuito electrónico para el manejo de cargas inductivas. Además, se guardan los datos de la posición del cilindro y del tiempo para el análisis de los resultados.

2.3 Sistema de medición de distancia

El lazo de control de retroalimentación se cierra por medio de la medición de la variable de salida del esquema de control, en este caso, de la posición del final del vástago del cilindro de doble efecto. Esta medición se ha logrado por medio de un sensor infrarrojo de distancia Sharp GP2Y0A21, cuyo rango de medición es de 10 a 80 cm y entrega un voltaje analógico como señal de salida.

La RPi no contiene incluido un ADC, por lo que se requiere de uno externo. El ADC usado es el ADS1115 que tiene una resolución de 16 bits y comunicación serial por el puerto I2C.

Además, se diseñó e imprimió con manufactura aditiva 2 piezas de material ácido poliláctico (PLA), mostradas en la Fig. 2. Una de ellas para fijar el sensor infrarrojo y la otra para posicionarla en el final del vástago del cilindro de doble efecto con la intención de que exista mayor superficie de contacto del haz infrarrojo durante la medición de distancia.

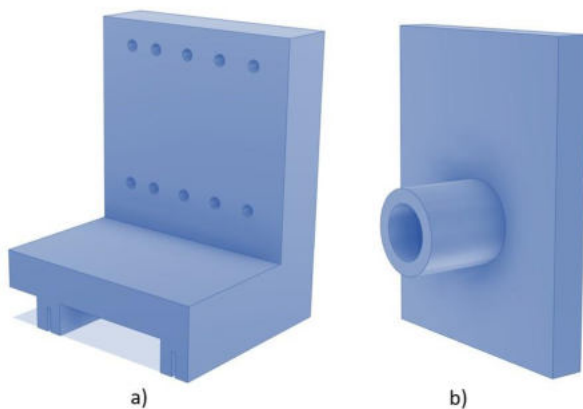


Fig. 2. Piezas con impresión 3D. a) Fijación del sensor infrarrojo. b) Acoplamiento en el vástago del cilindro de doble efecto.

2.4 Componentes electrónicos para manejo de cargas inductivas

La activación de la electroválvula se hace a través de la excitación del solenoide, por lo cual, se trata del manejo de una carga inductiva que funciona a 24 V CD y 5 A. En una primera etapa, se contempló usar un circuito electrónico basado en relevadores para activar la electroválvula, sin embargo, por la frecuencia de conmutación de la propia señal PWM, se realizó la implementación de dispositivos electrónicos que funcionen como un interruptor controlado por señales digitales y que soporten gran cantidad de corriente para lograr el manejo de carga inductiva. Como se muestra en la Fig. 3, se llevó a cabo a través de un transistor de unión bipolar (BJT) BC547 y de un transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) IRF640N, además, se incorporó un diodo 1N5408, de seguridad *Flyback*. Las características generales de estos componentes se muestran en la Tabla 1.

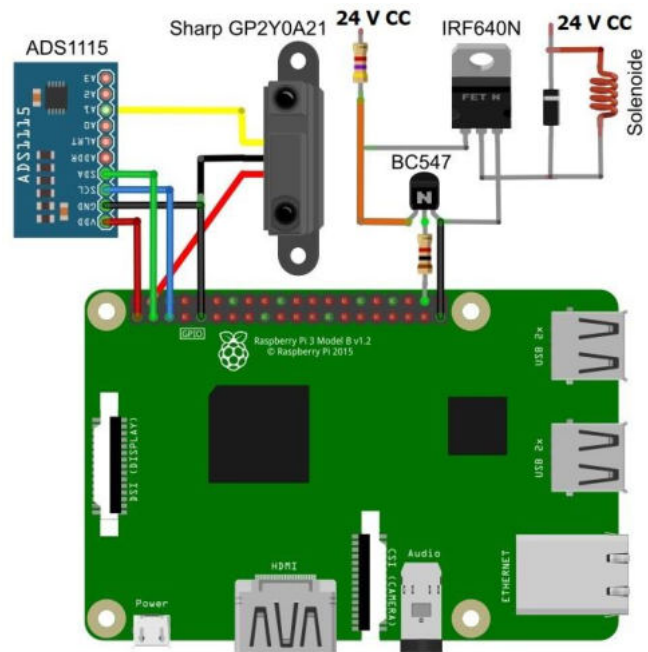


Fig. 3. Conexiones de la RPi con los componentes electrónicos.

Tabla 1. Características de elementos del circuito electrónico para cargas inductivas.

<i>IRF640N</i>	<i>1N5408</i>
Voltaje de drenaje a fuente: 200 V Corriente continua de drenaje: 18 A Voltaje de puerta a fuente: ± 20 V	1000 V de voltaje máximo y 3 A de corriente máxima

3. DISEÑO DEL CONTROL

3.1 Control PID

Como parte del control clásico en lazo cerrado de sistemas dinámicos, el análisis y diseño del controlador proporcional-integral-derivativo (PID) es imprescindible dentro de las sesiones de enseñanza-aprendizaje de la educación de la ingeniería. La ecuación matemática que describe a este controlador es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ es la señal del error, K_p , K_I y K_D son ganancias definidas positivas. El objetivo de control consiste en minimizar el error, definido como:

$$e(t) = y_d - y(t) \quad (2)$$

Donde y_d es la posición deseada, por su parte, $y(t)$ es la posición del cilindro de doble efecto, ambas en cm .

Uno de los objetivos de aprendizaje más importantes del controlador PID es respecto al efecto causado por cada una de las ganancias. Por ejemplo, es conocido que incrementar la ganancia proporcional K_p causa una disminución del error en estado estacionario, pero provoca un mayor porcentaje de sobretiro; aumentar la ganancia integral K_I hace que el error en estado estacionario tienda a cero mientras eleva el tiempo de asentamiento; por último, una variación creciente de la ganancia derivativa K_D hace que la respuesta del sistema sea más rápida, es decir, disminuye el tiempo de asentamiento.

3.2 Señal PWM

PWM son las siglas de *Pulse Width Modulation* entendida como modulación de ancho de pulso, la cual es una señal digital por medio de pulsos que se usa para propósitos de control de potencia.

Básicamente existen dos parámetros para el control por PWM, la frecuencia f y el *duty cycle*, como se observa en la Fig. 4. La frecuencia se define como el número de ciclos a ser producidos por segundo, o comúnmente como el inverso del periodo T ; mientras que el *duty cycle* es el valor entre 0 y 100 que representa el porcentaje del ancho del pulso. La señal PWM es emitida por alguno de los pines del GPIO de la Raspberry Pi, por tanto, la amplitud del pulso tiene un voltaje de $3.3 V_{CD}$.

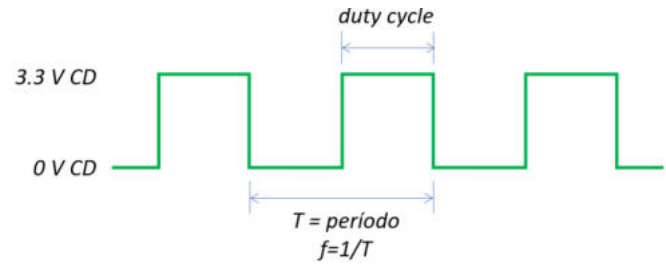


Fig. 4. Señal PWM generada por la Raspberry Pi.

3.3 Algoritmo de programación.

La manipulación del ancho de pulso, por medio de variar el *duty cycle*, se hace desde el código de programación en Python, ejecutado desde la Raspberry Pi.

De esta manera, la ley de control (1) es usada para generar el valor del *duty cycle* para la señal PWM, la cual, a través del circuito electrónico de manejo de cargas inductivas, activará a la electroválvula 4/2 para que el cilindro de doble efecto realice las acciones de control (avanzar o retroceder) según corresponda a la referencia. La frecuencia de la señal PWM se mantiene constante a un valor que se determinó a partir de las pruebas experimentales. El algoritmo de programación se muestra en la Fig. 5.

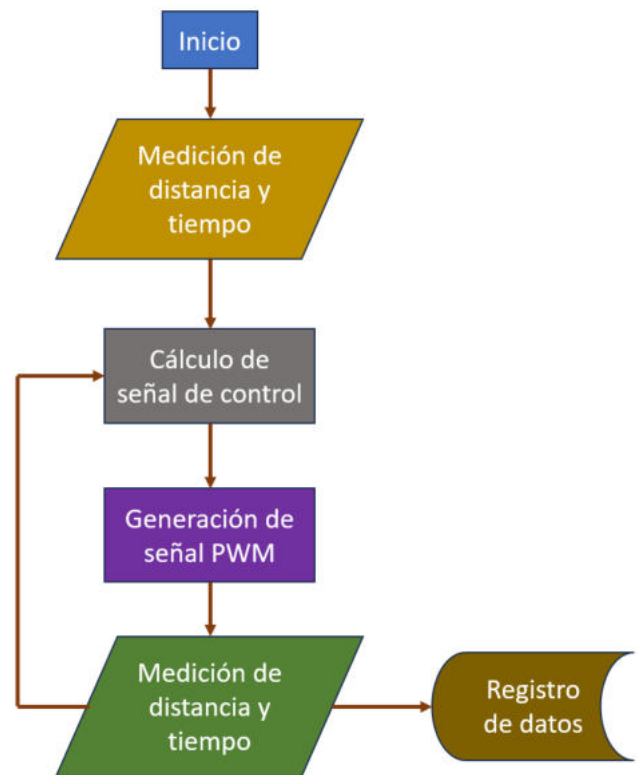


Fig. 5. Algoritmo de programación en Python para la implementación del control.

4. EXPERIMENTACIÓN

4.1 Montaje de experimentación.

Las pruebas experimentales de la implementación del control en lazo cerrado de un sistema electrohidráulico a través de una minicomputadora Raspberry Pi, se llevó a cabo en el Laboratorio de Manufactura de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato; en donde se encuentra el equipo electrohidráulico descrito en la sección 2.1, el cual se instrumentó con el sensor infrarrojo de distancia, se adaptaron las piezas fabricadas en impresión 3D y las conexiones necesarias con la minicomputadora y el circuito electrónico, como se detalla en la Fig. 6.

4.2 Pruebas experimentales.

La primera etapa de pruebas experimentales fue realizada para verificar el correcto funcionamiento de los componentes del sistema de control. En particular, se probó el comportamiento de la activación de la electroválvula 4/2 bajo la señal PWM generada por la Raspberry Pi. Los resultados obtenidos en esta primera etapa permitieron observar que un módulo de relevadores no es recomendado para uso de señales periódicas como la PWM, por la conmutación que se cause en la bobina del relevador.

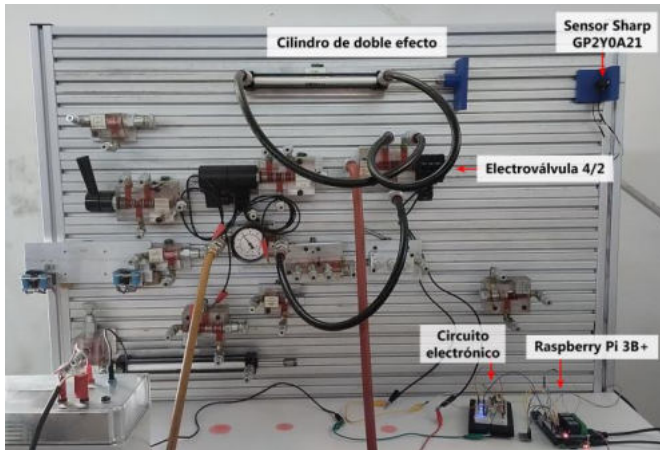


Fig. 6. Montaje experimental en el laboratorio de manufactura.

Así, se decidió diseñar e implementar el circuito electrónico de manejo de carga inductiva con el conjunto de transistores ya descrito. Después de pruebas experimentales, los valores de frecuencia y *duty cycle* con los que la electroválvula responde adecuadamente se presentan en la Tabla 2. Notar que la configuración del GPIO de la Raspberry Pi hace que físicamente se trabaje con lógica inversa.

Tabla 2. Valores obtenidos de manera experimental para señal PWM que activa la electroválvula.

	<i>Duty cycle</i>	Frecuencia
Cilindro avanza	< 78	< 12 Hz
Cilindro regresa	> 78	A frecuencias mayores, no hay control del cilindro

En la segunda etapa de experimentación se probaron distintos controladores, considerando que el cilindro inicie desde su posición totalmente retraído hasta alcanzar la posición deseada puesta como $y_d = 10 \text{ cm}$ y ahí permanezca.

El comportamiento de la electroválvula 4/2 con restitución por resorte hace que la implementación del control tenga mayor relevancia para permanecer en la posición deseada.

- ON-OFF. Utiliza un “si” condicional para activar y desactivar la electroválvula. No se genera señal PWM.
- P. Control proporcional, en función del error para generar la señal PWM. $K_p = 7.76$
- PD. Control proporcional-derivativo, en función del error y su derivada con respecto al tiempo para generar la señal PWM. $K_p = 5$; $K_D = 75$.
- PID. Control proporcional-integral-derivativo, en función del error, su integral y derivada respecto al tiempo para generar la señal PWM.
 - PID(1); $K_p = 5$; $K_I = 0.02$; $K_D = 0.2$
 - PID(2); $K_p = 5$; $K_I = 0.02$; $K_D = 0.5$

Notar que los valores de las ganancias fueron puestos de manera heurística, tomando en cuenta que la señal de control debería estar dentro del rango de valores del *duty cycle* de la señal PWM., es decir, para que la válvula conmute y el cilindro avance, es < 78. Así, en el control proporcional, por ejemplo, el valor de K_p es multiplicado por el error $e(t)$, el cual tiene un valor máximo al inicio de su carrera de 10. Por tanto,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) = 7.76(10) = 77.6 < 78.$$

En todos los casos, a excepción del control ON-OFF, la señal PWM tuvo una frecuencia constante de $f = 12 \text{ Hz}$ y el valor del *Duty cycle* fue el resultado de la expresión matemática de cada controlador, dentro de los límites establecidos en la Tabla 1. En la Fig. 7 se puede observar el desempeño de estos controladores.

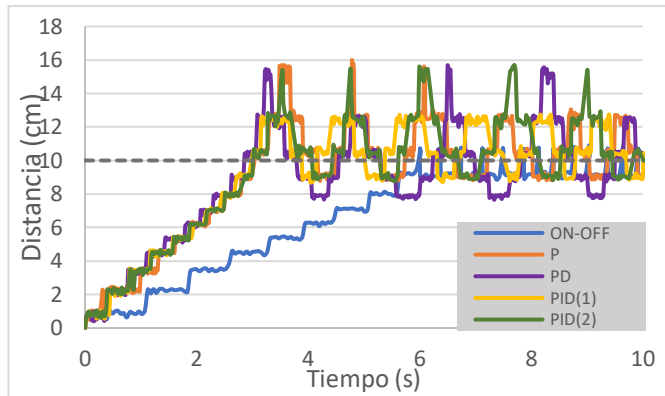


Fig. 7. Resultados de control de posición deseada del avance de un cilindro electrohidráulico.

Se observa que el control ON-OFF llega a la posición deseada, con un tiempo de elevación de alrededor de 6 s. Todos los otros controladores que están en función del error a través de la señal PWM alcanzan la posición de referencia con un tiempo de elevación menor al control ON-OFF.

En la Fig. 8 se muestran solo los controladores P, PD, PID(1) y PID(2), de los cuales, el control PD tiene un tiempo de elevación aún mayor. Los controles PID(1) y PID(2) tienen un comportamiento muy similar, se observa una mínima diferencia que el PID(2) es un poco más rápido que el PID(1) solo en el inicio de la salida del cilindro, lo cual comprueba el efecto causado por la ganancia derivativa K_D en una ley de control PID.

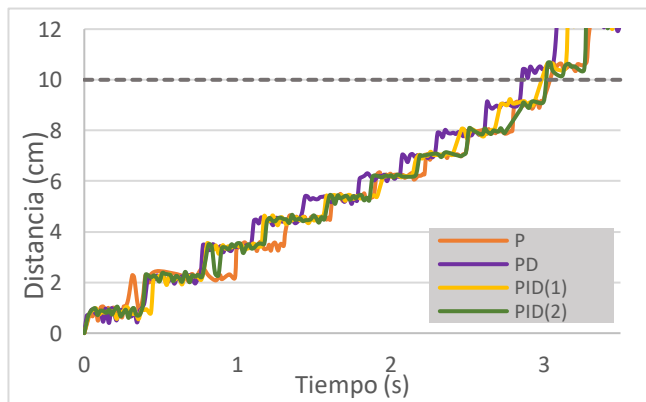


Fig. 8. Desempeño de los controladores en función de la señal PWM.

5. CONCLUSIONES

La implementación experimental de controladores clásicos en lazo cerrado para lograr la posición deseada del avance de un cilindro de doble efecto en un sistema electrohidráulico ha sido desarrollada en este trabajo con resultados que permiten comprobar el conocimiento teórico de los efectos causados por las ganancias de estos controladores.

Más aún, el montaje experimental que se ha establecido tiene la característica de utilizar componentes de bajo costo como la minicomputadora Raspberry Pi, la cual realiza las acciones de control e instrumentación. Así, el código de programación en Python permite generar la señal PWM a partir de la ecuación del controlador en función de los datos de la posición del cilindro, de manera iterativa. Además, la propia Raspberry Pi almacena los datos de posición y tiempo en un archivo tipo csv. En trabajos futuros se llevará a cabo un controlador de seguimiento de trayectoria, utilizando una función de transferencia que modele el sistema electrohidráulico linealizado. Para tal efecto, se considerará cambiar la electroválvula a una 4/3 con doble solenoide.

REFERENCIAS

- Karim, M. Z. B. A., y Thamrin, N. M. (2022). Servo Motor Controller using PID and Graphical User Interface on Raspberry Pi for Robotic Arm. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2319, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Mihajlov, M., Nikolić, V., y Antić, D. (2002). Position control of an electro-hydraulic servo system using sliding mode control enhanced by fuzzy PI controller. *Facta universitatis-series: Mechanical Engineering*, 1(9), 1217-1230.
- Milić, V., Šitum, Ž., y Essert, M. (2010). Robust H_∞ position control synthesis of an electro-hydraulic servo system. *ISA transactions*, 49(4), 535-542.
- Ramchandra, Y., Salim, M., Ankush, T., y Vasantrao, P. (2021). Self-balancing robot using Raspberry Pi and PID controller. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 6(4), 321-322.
- Shen, W., y Shen, C. (2021). An extended state observer-based control design for electro-hydraulic position servomechanism. *Control Engineering Practice*, 109, 104730.
- Škraba, A., Stanovov, V., y Semenkin, E. (2020). Development of control systems kit for study of PID controller in the framework of cyber-physical systems. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 734, No. 1, p. 012105). IOP Publishing.
- Tony Thomas, A., Parameshwaran, R., Sathiyavathi, S., y Vimala Starbino, A. (2022). Improved position tracking performance of electro hydraulic actuator using PID and sliding mode controller. *IETE Journal of Research*, 68(3), 1683-1695.
- Wang, Y., Zhao, J., Ding, H., y Zhang, H. (2021). Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection. *Journal of the Franklin Institute*, 358(3), 1839-1859.
- Won, D., Kim, W., y Tomizuka, M. (2020). Nonlinear control with high-gain extended state observer for position tracking of electro-hydraulic systems. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 25(6), 2610-2621.