

## Posicionamiento lineal de un cilindro neumático Festo utilizando control predictivo

### Linear positioning of a Festo pneumatic cylinder using predictive control

Estefano Roberto Chango Cuenca<sup>1</sup> ([echangoc@est.ups.edu.ec](mailto:echangoc@est.ups.edu.ec)) <https://orcid.org/0000-0001-9012-6536>

Jose Daniel Gavilanes Gualpa<sup>2</sup> ([jgavilanesg@est.ups.edu.ec](mailto:jgavilanesg@est.ups.edu.ec)) <https://orcid.org/0000-0003-1638-1170>

### Resumen

En el presente artículo se realizó la identificación del sistema de un proceso industrial didáctico, a través de la herramienta "System Identification" del software Matlab. Se realizó pruebas de posición de un cilindro doble efecto sin vástago, con lo cual se analizó las distintas respuestas del controlador implementado en este tipo de proceso. Para ello, se emplearon varios métodos científicos y técnicas como la experimentación, el análisis documental y la observación. Se comparó la respuesta de un control predictivo con controladores clásicos como son el control PID Fuzzy y PID, para determinar cuál de los siguientes controladores se ajustan mejor a la dinámica del sistema. Basado en el resultado de los estudios se concluyó que los tres controladores llegan al punto deseado.

**Palabras clave:** cilindro doble efecto sin vástago; control PID; control PID difuso; control predictivo; identificación del sistema; lógica difusa.

### Abstract

In this article, the identification of the system of a didactic industrial process was carried out through the "System Identification" tool of the Matlab software. The position tests of a double-acting cylinder without a rod were carrying out, which was analyzed the different answers from controller implemented in this type of process. For this, various scientific methods and techniques were used such as the experimentation, documental analysis and observation. A predictive control response was comparing with classic controllers such as the Fuzzy PID control and PID control, to determine which of the following controllers best fit the dynamics of the system. Based on the results of the studies it was concluding that the three controllers reach the desired point.

**Key words:** double acting cylinder without rod; fuzzy logic; fuzzy PID control, PID control; predictive control; system identification.

---

<sup>1</sup> Estudiante egresado UPS. Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.

<sup>2</sup> Estudiante egresado UPS. Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.

En la actualidad, la tecnología está en constante avance y el campo de control automático no es la excepción, ya que hoy en día se requieren sistemas inteligentes para controlar múltiples procesos, con alta velocidad de procesamiento (Mayta y Tintaya, 2018), (Pantoja, 2013).

Asimismo, la política trazada sobre Ciencia, Tecnología, Innovación, establece impulsar la generación y potenciación de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación. De manera que, el conocimiento científico y el conocimiento, fluyan hacia el desarrollo de tecnologías. Lo anterior, para resolver situaciones y problemas propios de los procesos de la producción, dirección, administración y gestión de la sociedad, según Santos, Ponce y Barberán (2018).

En este sentido, el control automático tiene una intervención cada vez más importante en la vida diaria y se ha convertido en parte importante e integral de los procesos modernos. Además, brinda los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción (Manzano y Careta, 2018), (Ojeda, 2015).

Sobre esta base, los sistemas de control automático se pueden clasificar según su estructura en dos categorías: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado (Galán y col., 2000). Los primeros son los más sencillos, no toma en consideración la respuesta del sistema que está controlando. Por el contrario, los controladores de lazo cerrado sí toman en cuenta la respuesta del sistema que controlan y son los más utilizados. Existen una gran variedad de controladores de lazo cerrado, en particular el controlador clásico más usado es el controlador PID (Noriega, 2011), (Jara y col., 2015). Este se usa para controlar diversos sistemas como hornos, motores de corriente directa, entre otros (Castillo, 2009), (Farid, 2008).

De manera que, un controlador PID considera datos pasados y presentes, y predice el comportamiento futuro de un proceso por extrapolación lineal. Sin embargo, una buena predicción puede mejorar el desempeño de los controladores, particularmente cuando el proceso presenta retardos, lo cual es común en el control de procesos (Cascante y Orellana, 2017). Por ello, los retardos se pueden deber a un mecanismo de retardo puro, causado por el transporte o el tiempo requerido para los cálculos y la comunicación, o a mediciones obtenidas en un análisis off-line.

Además, aparecen cuando un sistema de alto orden o una ecuación diferencial parcial se aproximan a un modelo de bajo orden, como es el ejemplo de la conducción de calor. Por otro lado, existen controladores que pueden tratar este tipo de procesos. EL presente estudio se enfoca al control de posición lineal de un cilindro doble efecto neumático conectado a una válvula 5/3, destacando que las válvulas han sido identificadas como la principal fuente de problemas a nivel de lazo en el control de procesos.

Consecuentemente, se tiene en cuenta la situación anterior. Por tanto, el objetivo de la investigación es controlar y posicionar un cilindro neumático Festo mediante Control

Predictivo. Lo anterior, permite su ajuste a la dinámica del sistema, a partir de la evaluación de los parámetros de overshoot y tiempo de estabilización.

## Material y Métodos

La investigación realizada comprende un estudio experimental debido a que se fundamenta en la realización de pruebas de posición de un cilindro doble efecto sin vástago utilizando control predictivo. Posteriormente, se realiza la comparación de las distintas respuestas del mismo con controladores clásicos como el control PID Fuzzy y PID, para determinar cuál de estos controladores se ajustan mejor a la dinámica del sistema, Hernández y Pinzón (2014). De ahí que, para darle cumplimiento al objetivo general definido fueron propuestos los siguientes objetivos específicos:

- Identificar la función de transferencia del sistema por la herramienta Ident de Matlab.
- Implementar y sintonizar un Control Predictivo extendido.
- Implementar un sistema embebido que permita monitorear la variable de salida del sistema en tiempo real.
- Definir mediante la comparación de los parámetros de *overshoot* y tiempo de estabilización, cuál es el algoritmo que mejor se ajusta a la dinámica del sistema entre el control Predictivo, PID clásico y PID Fuzzy.

Al respecto, en la investigación se aplicó un enfoque mixto, cualitativo y cuantitativo. Para ello, se emplearon diversos métodos científicos y técnicas, entre las que se destacan:

- Experimentación: Se utilizó para la realización de pruebas de posición de un cilindro doble efecto sin vástago utilizando control predictivo, así como la comparación de las distintas respuestas del mismo con controladores clásicos, para determinar cuál de estos se ajustaron mejor a la dinámica del sistema.
- Observación: Se empleó para analizar las características y particularidades de cada uno de los controladores: Predictivo, PID clásico y PID Fuzzy, para evaluar el comportamiento de los parámetros de overshoot y tiempo de estabilización.
- Método analítico-sintético: Permite analizar cada uno de los controladores: Predictivo, PID clásico y PID Fuzzy. Todo ello permitió llevar a cabo análisis más profundo para arribar a conclusiones precisas con aportes prácticos reales.
- Método inductivo-deductivo: Se utilizó para guiar la investigación desde la definición del objetivo hasta la verificación de su cumplimiento por medio de cada uno de los objetivos específicos formulados.
- Análisis documental: Se empleó para el desarrollo de la investigación, a partir de la consulta de artículos científicos y libros electrónicos, indexados en bases de datos de impacto, publicados esencialmente en el periodo comprendido de 2014 a 2019.

A continuación se aborda un glosario de los términos más importantes:

**Cilindro neumático:** Es un actuador neumático capaz de transformar la energía acumulada en el aire comprimido en energía mecánica mediante un movimiento rectilíneo.

**Cilindro doble efecto:** Los cilindros de doble efecto pueden realizar el trabajo en ambas direcciones porque se les aplica la presión en ambas caras del émbolo. Principalmente se utilizan dos tipos de configuraciones:

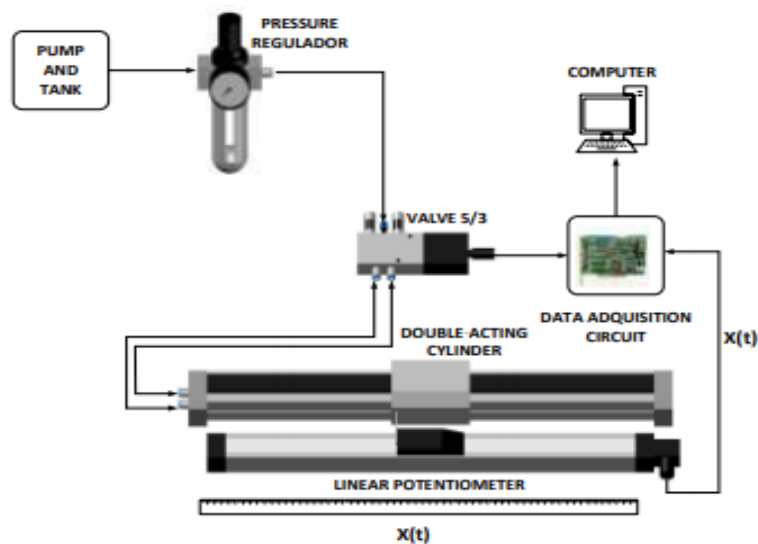
**Control PID:** un controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial.

**Control PID Difuso:** Dentro de los controles PID, es un esfuerzo por mejorar el desempeño, algunos fabricantes de instrumentos están explorando la utilidad de usarse "lógica difusa" para control de proceso

**Control Predictivo:** También conocido en la industria como control multivariable o control avanzado, es una estrategia de control que se ha impuesto en las últimas décadas en la industria de procesos como la mejor opción para controlar un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas.

### Planteamiento del proyecto

En este artículo, se presenta una forma alternativa para controlar y monitorear en tiempo real la variable posición de un cilindro neumático doble efecto sin vástago sujeto a un potenciómetro lineal de 0-10v, que es accionado por una válvula proporcional 5/3 FESTO a una presión de aire de 2Bar. En la Figura 1 se muestra el diagrama del sistema diseñado:



**Figura 1.** Diagrama del sistema diseñado. Fuente: elaboración propia.

En este sentido, el sistema estará montado en un módulo para realizar futuras prácticas de controladores sobre dicha planta. En el HMI se visualizará el funcionamiento del sistema neumático. Además, se implementará un sistema embebido con el programa que pueda permitir la supervisión del sistema neumático en tiempo real, desarrollado en el software LabView. Para ello, la tarjeta myDAQ servirá para la comunicación entre la planta y el sistema embebido.

### Adquisición de datos

La planta se conecta a un computador utilizando una tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 Advantech. Por tanto, se diseñó un diagrama de bloques en Simulink el cual permite la interfaz entre el computador y la planta que nos permite estimular el sistema con distintas señales de control para conocer su comportamiento y posteriormente poder realizar la identificación del sistema.

En consonancia con lo anterior, para realizar la identificación del sistema, se necesitó muestras de datos del proceso, para lo cual se utilizó la tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI 1711, como se muestra en la Figura 2. De manera que, el empleo de dicha tarjeta permitió tener un tiempo de muestra de 0.001s, lo que significa que se puede tomar 1000 datos por segundo.

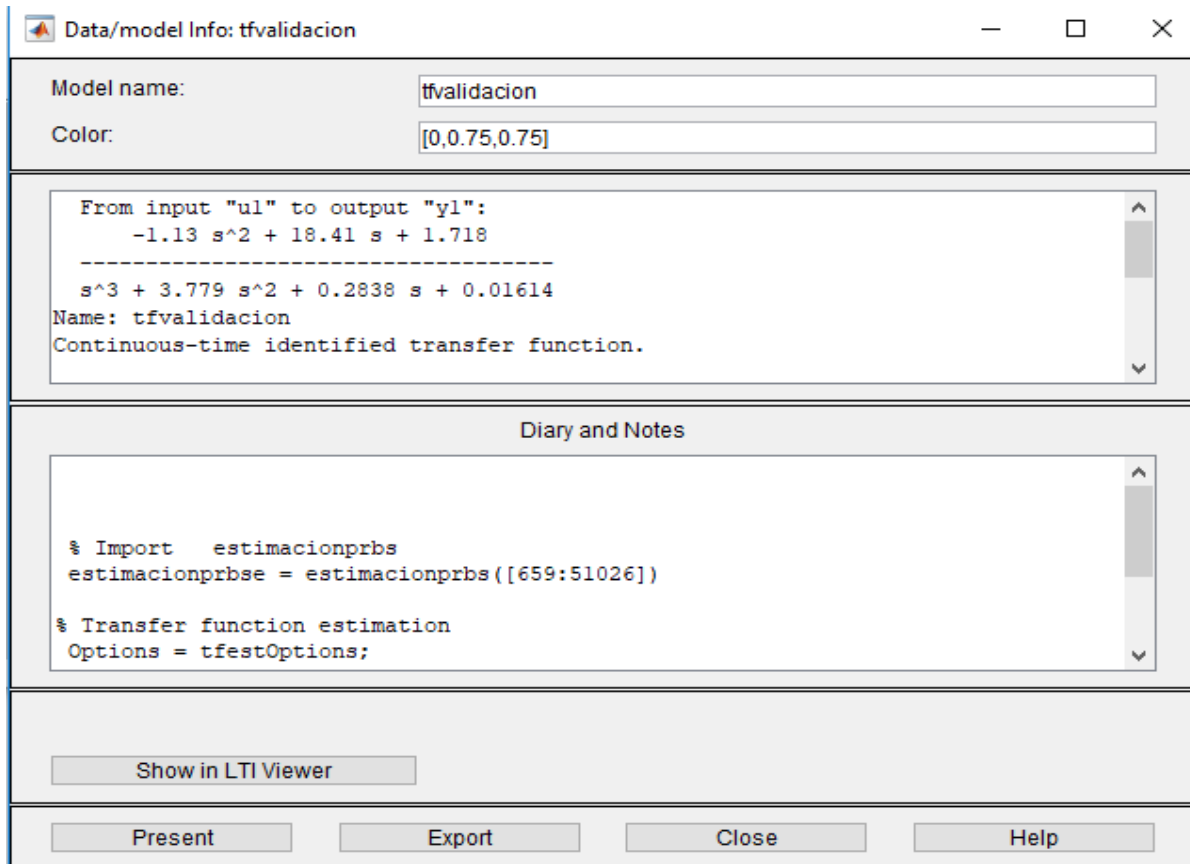


**Figura 2.** Tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI 1711. Fuente: (Zapata, 2018).

Sobre esta base, para obtener los datos se diseñó un programa en la herramienta Simulink del software de Matlab. Esto, permitió realizar el control de la planta en lazo abierto utilizando la antes mencionada PCI 1711. Para ello, la señal de entrada que se escogió a través de pruebas, fue una señal PRBS (Señales Binarias Pseudo Aleatorias) ya que esta nos permitió tomar datos en todo el rango de operación de la planta durante un tiempo considerable. Además, se utilizó un rango de -0.5 hasta 0.5 en amplitud, debido a que la válvula proporcional MPYE-5-1/8 de FESTO opera en subida a un voltaje mayor a 5v y de bajada a un voltaje menor a 5v, de esta forma en lazo abierto se puede obtener datos de subida como de bajada.

### Identificación del sistema

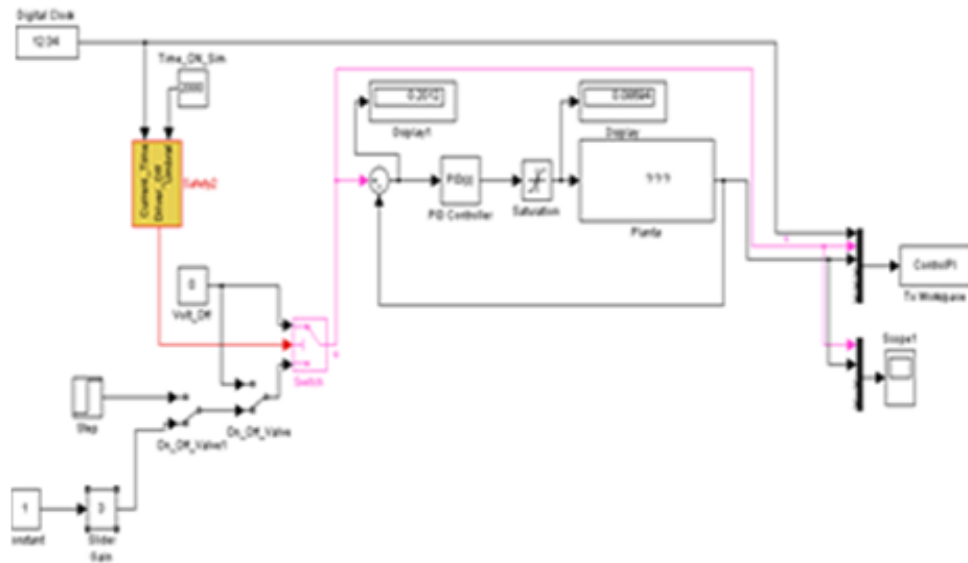
Al respecto, para la obtención de la función de transferencia, se utilizó la herramienta “*System Identification*” de Matlab, con la cual se importaron los datos de la muestra PRBS, como se puede apreciar en la Figura 3. Luego de procesados los resultados, el porcentaje de estimación obtenido fue superior al 80%. De ahí que, la función de transferencia fue correctamente evaluada y validada con datos, todo lo cual permitió evidenciar los excelentes resultados obtenidos.



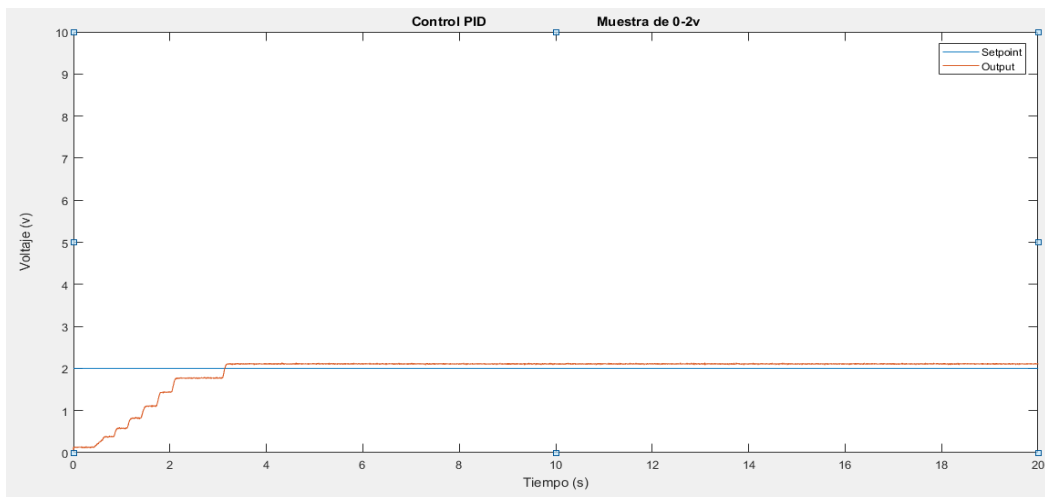
**Figura 3.** Obtención de la función de transferencia en Matlab. Fuente: elaboración propia.

## Control PID

En este sentido, se asevera que son empleados en muchas industrias para el control de diferentes tipos de mecanismos los cuales requieren un control preciso en su desempeño. Este sistema, se basa en calcular el error de un valor medio y el valor deseado (Lara, 2018), Verdés y González (2015). En la Figura 4 se puede apreciar el diagrama de bloques del controlador PID Clásico, mientras que en la Figura 5 se puede observar la obtención de la señal de 2v con el controlador PID.



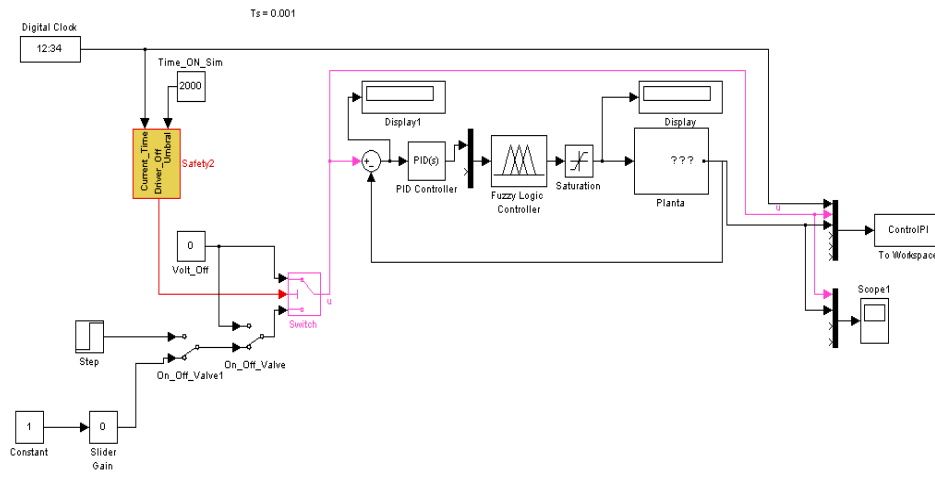
**Figura 4.** Diagrama de bloques del controlador PID Clásico. Fuente: elaboración propia.



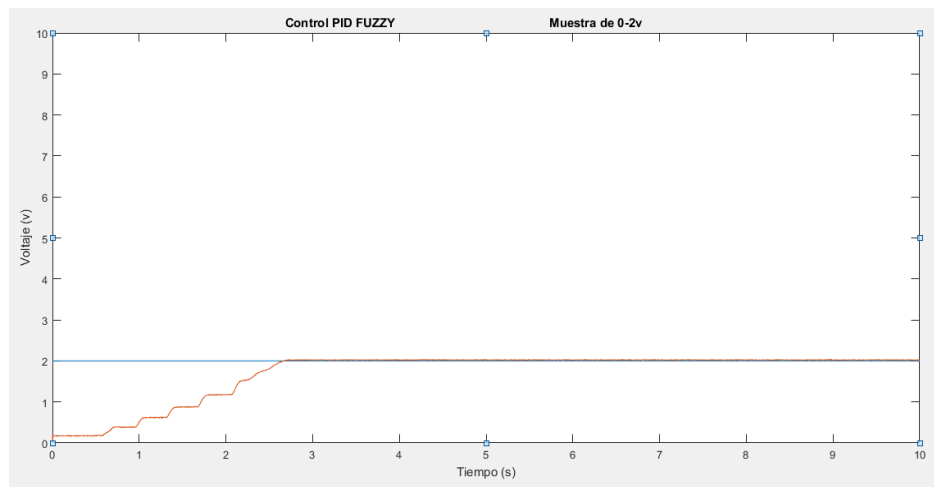
**Figura 5.** Obtención de la señal de 2v con el controlador PID. Fuente: elaboración propia.

### Control PID difuso

En este sentido, los controles PID estándares no son adecuados para implementarlos en sistemas no lineales (Mishra y col., 2015). Por ello, en esta sección, se propone el diseño de un controlador PID difuso de dos etapas para eliminar los fenómenos de subdisparos no deseados. De ahí que, en la Figura 6 se puede observar la implementación del controlador PID FUZZY, mientras que en la Figura 7 se puede observar la obtención de la señal de salida en 2v del PID Fuzzy.



**Figura 6.** Diagrama de bloques del controlador PID-Fuzzy. Fuente: elaboración propia.



**Figura 7.** Obtención de la señal de salida en 2v del PID Fuzzy. Fuente: elaboración propia.

### Control predictivo extendido

En consonancia con lo anterior, se asevera que las ideas fundamentales del controlador predictivo EPSAC (Extended Prediction Self-Adaptive Control), mediante el cual se modela el proceso en cuestión, son las mismas que las de cualquier controlador predictivo: estimar una secuencia futura de control, minimizando un índice que esta relaciona con los errores de las variables controladas y el esfuerzo de control, sujeto a ciertas restricciones. Por tanto, en el controlador predictivo EPSAC se basa la investigación desarrollada, como se muestra en la Figura 8.

Sobre esta base, el controlador predictivo extendido (EPSAC) aprovecha las ventajas de realizar, en cada periodo de muestreo, una previsión a lo largo de un horizonte limitado, del comportamiento del proceso que se va a controlar. Asimismo, EPSAC supone que la entrada al proceso va a permanecer constante en todo el rango de previsión. Esto, permite efectuarlo, aunque luego la señal de control en cada período de



muestreo, vendrá dada por el procedimiento de cálculo, no siendo así prefijada (García, 1993).

El algoritmo utilizado trabaja con modelos que pueden ser representados de la siguiente forma:

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (1)$$

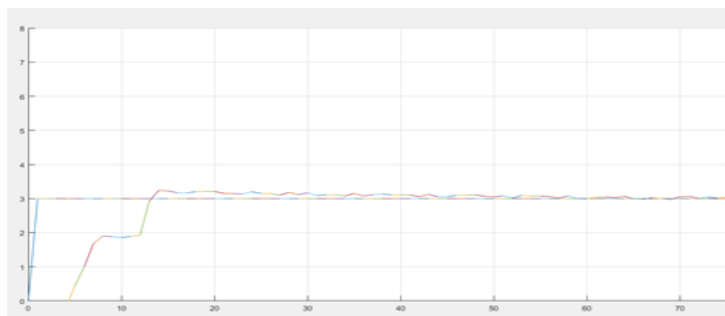
Donde:

- $y(t)$  : Salida medida del proceso
- $u(t)$  : Entrada del proceso
- $x(t)$  : Salida del modelo
- $n(t)$  : Disturbios del modelo y del proceso



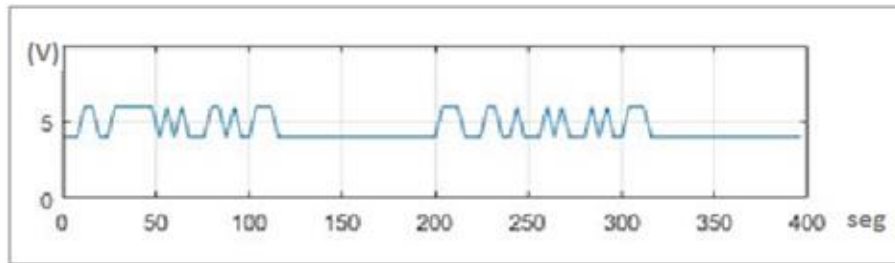
**Figura 8.** Modelo del proceso en EPSAC. Fuente: elaboración propia.

En este sentido, a continuación, en la Figura 9, se muestra la respuesta al aplicar el controlador predictivo extendido a la señal del desplazamiento del cilindro neumático. En este, la señal en azul es el *set point* (voltios) que es el posicionamiento del cilindro y la roja es la señal de salida es decir el posicionamiento alcanzado después de aplicar el control predictivo, todo esto trabajando con una presión de 2 Bar.



**Figura 9.** Señal de salida del controlador predictivo. Fuente: elaboración propia.

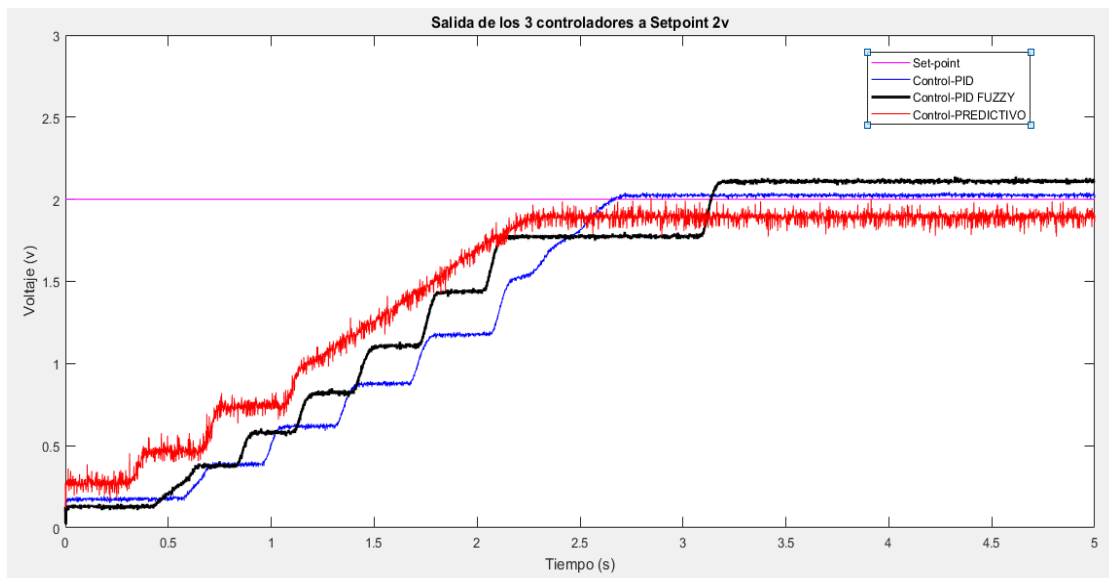
Por otra, en la Figura 10, se muestra la señal en voltaje que es suministrado a la válvula controladora del desplazamiento del cilindro neumático de Festo, trabajando a presión de 2BAR.



**Figura 10.** Valor de la señal aplicada a la válvula. Fuente: elaboración propia

### Análisis y discusión de resultados

Consecuentemente, como parte del análisis y discusión de los resultados, en la Figura 11 se muestra la comparativa final en la ejecución de los tres controles analizados (Control PID, Control PID Difuso y Control Predictivo), como resultado fundamental de la investigación. Asimismo, en la Tabla 1 se comparan los tres controles mediante datos experimentales.



**Figura 11.** Comparativa en la ejecución de los tres controles analizados. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1.** Comparación entre los tipos de controles mediante datos experimentales. Fuente: elaboración propia.

Tipo de control	Pico Máximo	Tiempo de estabilización
Control PID	0.1%	2.7 segundos
Control PID Difuso	1%	3.24 segundo

Control Predictivo (MPC)	-1.2%	2.35 segundos
--------------------------	-------	---------------

Luego de realizada la investigación se concluye que:

Se realizó la identificación del sistema utilizando la herramienta “*System Identification*” del software Matlab, para lo cual se empleó diversas excitaciones de la planta, como señales de tipo paso, impulso, senoidal, PRBS. Lo cual permitió la obtención de porcentajes de asimilación que permiten concluir que la función de transferencia obtenida es la adecuada para trabajar.

La comparación y experimentación de resultados entre los controladores permitió concluir que todos mostraron resultados favorables en su ejecución, en cuanto a los valores requeridos, estabilización y niveles de oscilación. Tales resultados fueron posibles a partir de una adecuada sintonización del control a través de software y los ajustes mecánicos realizados en el sistema físico.

El análisis del estado del arte, así como la modelización del sistema, permitieron concluir que la metodología propuesta por De Keyser (1988) “método extendido o estudio del controlador predictivo” es adecuado y posibilita obtener excelentes resultados en el contexto de la presente investigación.

Obtener varios tipos de excitaciones del sistema cuando se trate de generar una identificación de sistemas, de forma que se obtenga una cantidad considerable de datos y de resultados de pruebas, para poder caracterizar de una mejor forma la planta.

Ajustar un lazo de control para que el sistema alcance una consigna depende de la sintonización en software como de calibración física de una planta. Para ello, explorar materiales que contribuyan con el manejo de la variable de la planta.

Aplicar distintos métodos de control permite comparar los resultados obtenidos, lo cual nos permite determinar que método es el que mejor se ajusta a la dinámica del sistema.

## Referencias

- Cascante, A., y Orellana, J. (2017). *Modelado y control de posición de un cilindro de doble efecto utilizando Pid y Pid-difuso con matlab y labview*. (Tesis de diploma inédita). Ecuador
- De Keyser, R. M., Van de Velde, P. G., y Dumortier, F. A. G. (1988). A comparative study of self-adaptive long-range predictive control methods. *Revista Automática*, 24(2), 149-163.
- Farid, M., y Faruq, M. (2008). *PID controller design for dc motor using Matlab application*, (Tesis doctoral inédita), University Malaysia Pahang.
- Galán, R., Jiménez, A., Martíá, F., y Sanz, R. (2000). Control inteligente, Inteligencia artificial: *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 4(10), 43–48.
- García, H. L. (1993). *Control por computador: diseño y realización práctica*. Universidad de Oviedo. ISBN: 84-7468-778-0.

- González, A., y Sala, A. (2014). Control predictor con ponderación de retardos: análisis de prestaciones y robustez ante retardo variable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(2), 155-166.
- Hernández, E., Díaz, J. L., y Pinzón, O. (2014). Estudio del comportamiento de un Control MPC [Control Predictivo Basado en el Modelo] comparado con un Control PID en una Planta de Temperatura. *Revista Facultad de Ingeniería*, 23(37), 45-54.
- Jara, C. E., Achig, M., y Luis, J. (2015). *Diseño e implementación de un controlador PID y un MPC aplicado al posicionamiento lineal de un sistema neumático en bucle cerrado* (Tesis de diploma inédita). Ecuador
- Lara, A. A. D. A. (2018). *Estudo comparativo da técnica de controle preditivo DMC e o controlador PID*. (Tesis de diploma inédita), Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Manzano, A. F. C., y Careta, E. P. (2018). PID Instrumented control elements estimation based on probabilistic methods. *Revista Jóvenes en la Ciencia*, 4(1), 2492-2500.
- Mayta, L. A., y Tintaya, E. R. (2018). *Diseño de un controlador PID-difuso en la plataforma de LabView para el control de niveles de agua aplicados en el laboratorio de control y automatización de la EPIME*. (Tesis doctoral inédita) Ecuador.
- Mishra, P., Kumar, V., y Rana, K. P. S. (2015). A fractional order fuzzy PID controller for binary distillation column control. *Journal Expert Systems with Applications*, 42(22), 8533-8549.
- Noriega, M. (2011). *Implementación de un sistema de control digital de la velocidad de un motor DC utilizando redes inalámbricas*. (Tesis doctoral inédita). Ecuador
- Ojeda, A. (2015). *Control predictivo basado en modelo para estructura robótica paralela de dos grados de libertad* (Tesis Doctoral inédita), Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas).
- Pantoja, W. A. (2013). *Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID Difuso en lógica reconfigurable* (Tesis de Ingeniería inédita). Universidad del Istmo Campus Tehuantepec. Oaxaca, México.
- Santos, A., Ponce, E., y Barberán, J. (2018). El proceso de Formación Profesional de Ingeniería: principales características. *Opuntia Brava*, 10(4), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.35195/ob.v10i4.611>
- Verdés, R. I., y González, A. I. (2015). Controladores MPC y PID con autoajuste para un proceso de dinámica rápida a través de MATLAB®/Simulink® y OPC. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 36(3), 80-93.
- Zapata, B. R. (2018). *Desarrollo e implementación de un control de orientación y elevación mediante control en modo deslizante y control MPC lineal, aplicado a*

---

*un sistema aerodinámico TRMS (Twin Rotor MIMO System) (Tesis de maestría inédita). Quito, Ecuador.*