

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN CONTROLADOR PID Y UN CONTROLADOR DIFUSO, PARA UN SISTEMA DE PRESIÓN DE COMBUSTIBLE

Juan Diego Valladolid Quitoisaca¹
Diego Nestor Rivera Campoverde²
Andrea Karina Bermeo Naula³
Kevin Jacinto Pugo Calle⁴

Autor para correspondencia: jvalladolid@ups.edu.ec

¹ Investigador del grupo de Investigación Social y Acción Participativa (GISAP). Universidad Pablo de Olavide. Sevilla. España. Docente, Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz

² Docente, Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz

³ Estudiante, Universidad Politécnica Salesiana, Miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz

⁴ Estudiante, Universidad Politécnica Salesiana, Miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz

Manuscrito recibido el 29 de febrero de 2016
Aprobado tras revisión el 30 de junio de 2016

RESUMEN

En este documento se presenta la metodología para implementar un controlador de presión de combustible basado en lógica difusa y la comparación de su desempeño con un controlador PID clásico. El procedimiento de diseño del controlador difuso como la declaración de variables, la difusificación, el mecanismo de inferencia, la base de conocimiento y la desdifusificación del sistema, son discutidos en este trabajo. Los parámetros de rendimiento de los controladores propuestos se miden por sus características en tiempo. La aproximación de segundo orden de la dinámica del motor Renault Samsung SM7 se obtuvo mediante pruebas de identificación en el sistema físico. Detalles del análisis de los datos obtenidos durante la simulación e implantación serán discutidos utilizando herramientas computacionales como MATLAB y Simulink, en donde se muestra la robustez y la efectividad de los controladores propuestos.

Palabras claves: control PID, controlador difuso, función de membresía, sobreimpulso.

ABSTRACT

This paper presents the methodology to implement a fuel pressure controller based on fuzzy logic and compares its performance with classic PID controller. The design procedure of the fuzzy controller as declaring variables, the fuzzification, the inference mechanism, the knowledge base and defuzzification of the system are discussed in this work. The performance parameters of the proposed controllers are measured for their properties in time. The second order approximation of the Renault Samsung SM7 engine dynamics was obtained by identification tests on the physical system. Details of the analysis of data obtained during the simulation and implementation will be discussed using computational tools such as MATLAB and Simulink, where the robustness and effectiveness of the proposed controller are shown.

Key words: control PID, fuzzy control, membership function, overshoot.

INTRODUCCIÓN

La presión de combustible que la bomba suministra a los demás componentes del sistema de alimentación debe ser la predeterminada por el fabricante según el sistema de inyección (Olvera, 2011), para una buena combustión y un rendimiento más eficiente (Ro-

dríguez, 2014). Debido a que el flujo de combustible va desde el depósito de combustible al regulador, la bomba trabajará todo el tiempo, esto representa un gasto energético innecesario, por lo que se implementará un controlador para mantener la presión requerida por el sistema en diferentes condiciones de funcionamiento, esto permitirá que la bomba trabaje de manera eficiente, prologando así la vida útil de la misma.

La regulación de la presión se puede realizar mediante, un controlador PID clásico y un controlador basado en lógica difusa. El controlador PID se utiliza para eliminar el error de estado estable y aumentar la estabilidad del sistema (Dorf, 2010). Los parámetros del controlador están generalmente configurados usando el método de respuesta de frecuencia de Ziegler-Nichols (Zulkifli, 2014). La evaluación de los métodos da resultados exitosos, pero se requiere mucho tiempo y esfuerzo para obtener una respuesta satisfactoria del sistema debido a que se debe conocer el modelo matemático de la planta.

Una de las ventajas del controlador por lógica difusa es que se puede aplicar con éxito para controlar sistemas en donde la planta es desconocida (Sudha, 2012). Cuando la bomba de combustible vuelve a un punto de operación, el compensador difuso se ajusta al adecuado ciclo de trabajo, debido a que es un sistema inteligente con una base de conocimiento que determina las acciones del controlador sobre la planta. Esto puede mejorar el rendimiento del motor durante el estado transitorio y cuando se cambia el punto de funcionamiento abruptamente, ya que el sistema difuso se adapta de acuerdo a la salida del sistema. Cuando el motor tiene cambios en sus variables físicas, el sistema se adecuará a los nuevos valores con el fin de entregar el ciclo de trabajo apropiado bajo diferentes condiciones del motor. Un controlador difuso no requiere un modelo matemático, sin embargo, para efectos de análisis de desempeño se identifica el modelo de la planta para ser usado en las simulaciones.

Algunos estudios incluyen que al implementar un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300 logran mejorar el rendimiento en procesos complejos lineales o no lineales en la industria (Lemus, 2011). En la simulación de la unidad de control de combustible basado en un sistema de lógica difusa para motores de aviones (Ramaniya & Suprijadi, 2009) se observa que la unidad de control de combustible basado en lógica difusa fue capaz de estabilizar el motor ante la presencia de perturbaciones.

Según Ramanathan (2014), en su estudio comparativo entre un controlador PID y un controlador difuso para el proceso de regulación de temperatura, obtiene un controlador difuso que es capaz de obtener una respuesta transitoria más rápida con lo que se reduce el máximo sobre impulso, la respuesta de estado estacionario es más estable y existe menos dependencia del punto de funcionamiento.

El presente trabajo muestra el proceso de identificación de la planta seguida de la implementación de los controladores PID y difuso. Además, se realiza un análisis de comportamiento y desempeño frente a señales de entrada del tipo escalón, cambios de referencia durante el periodo de control y perturbaciones externas no mantenidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de combustible

Este sistema es el encargado de suministrar la suficiente cantidad de carburante para que se produzca la inyección correcta en diferentes puntos de funcionamiento, está formado por un depósito, en cuya parte interior se encuentra sumergida una electrobomba, que eleva el combustible hacia un filtro que se encarga de limpiar las impurezas, una vez filtrado se dirige hacia el distribuidor, y este a su vez pasa a cada válvula de inyección para ser respectivamente distribuido a cada cilindro, al haber un exceso de presión entra en acción la válvula reguladora manteniendo una presión constante en el sistema.

La presión aumenta proporcionalmente al aumentar el nº de rpm, es decir, una parte del caudal de combustible transportado retorna (Serrano, 2011), a través de la válvula reguladora de presión a la entrada de la bomba. El retorno del carburante ocasiona una pérdida de energía por lo que es necesario que la bomba trabaje solamente cuando sea necesario reduciendo así el consumo del hidrocarburo.

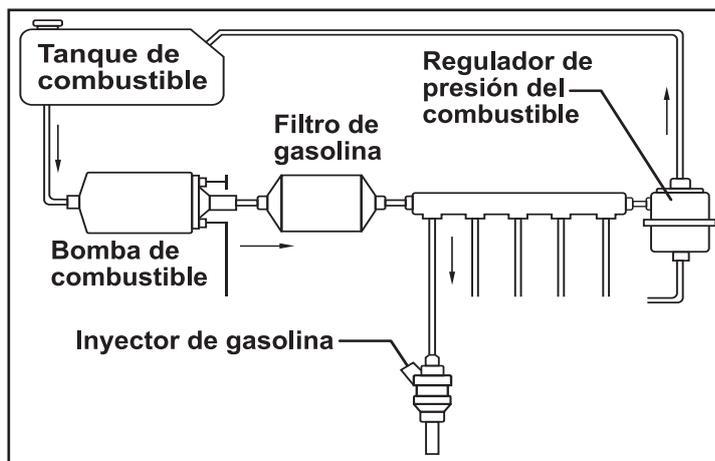


Figura 1.
Sistema de combustible convencional.

Fuente:
Crouse, 1993

Unidad experimental

La presión de combustible que se controló pertenece a un motor correspondiente a una maqueta de prácticas del taller automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), cuyas especificaciones se observan en la Tabla 1.



Figura 2.
Maqueta de prácticas

Fuente:
Valladolid, J., Rivera, D.,
Bermeo, A., Pugo, K., 2016

MODELO	SAMSUNG SM7
Número de cilindros	V6
Número de válvulas	24
Colector	Nylon de Nissan
Cilindrada	3498cc
Alimentación	Inyección Electrónica Multipunto
Potencia	217/5700cv/rpm
Torque	314/3500Nm/rpm

Tabla 1.
Especificaciones de la
maqueta de prácticas del
taller automotriz de la UPS

Fuente:
Valladolid, J., Rivera, D.,
Bermeo, A., Pugo, K., 2016

Identificación de la planta

Para el desarrollo del método experimental se realiza el control de la presión de combustible de un motor Renault Samsung SM7 indicado en la Figura 2, el cual trabaja con una presión de 0.27- 0.31Mpa. El tanque normal de gasolina de la maqueta fue sustituido por un tanque con línea de retorno al depósito.



Figura 3.
Tanque de combustible con línea de retorno al depósito

Fuente:
Valladolid et al. 2016

Para la identificación de la planta se ingresó un valor máximo de PWM (pulse-width modulation) al módulo de encendido que este a su vez amplifica la señal para luego ingresar a la electrobomba de combustible, de esta manera se obtiene como salida la presión de la planta que es medido a través de un sensor de presión. Para la identificación de la planta se realiza en lazo abierto como se observa en la Figura 4.

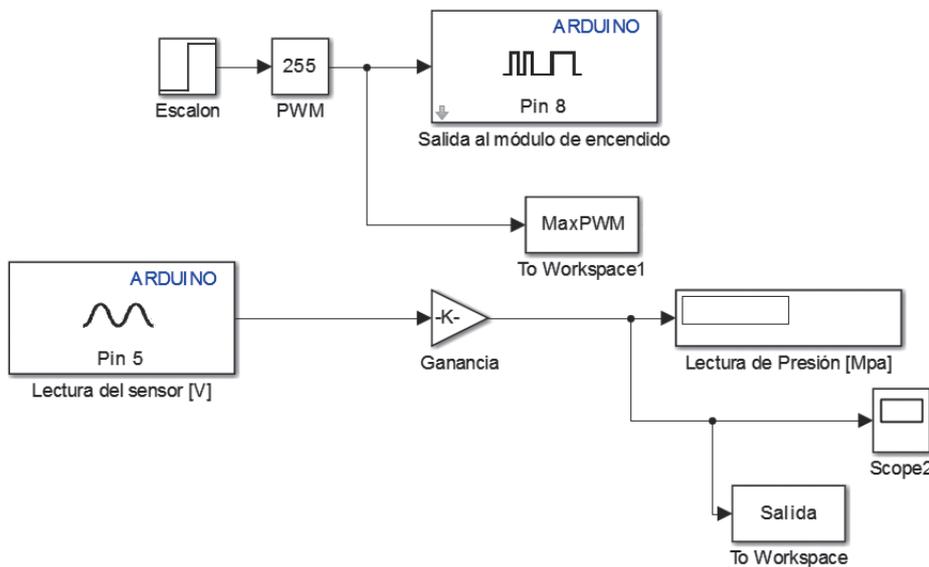


Figura 4.
Esquema para la identificación de la planta

Fuente:
Valladolid et al. 2016

En la Figura 4, se tiene una entrada en el Pin 5 que es la lectura del sensor, este valor es medido en voltaje [V] que a su vez es multiplicado por una ganancia que transforma el valor de voltaje en Mega Pascal [Mpa] y se obtiene el valor de presión (output). Mientras tanto el Pin 8 es la salida que va al módulo de encendido (input), los valores medidos deben ser trasladados al workspace. Una vez determinado esto se utiliza la herramienta IDENT (Mathworks, 2016) en el que se introducen las variables input y output antes mencionadas. Esta herramienta nos permite identificar o estimar un modelo matemático sin conocer los parámetros técnicos de la planta.

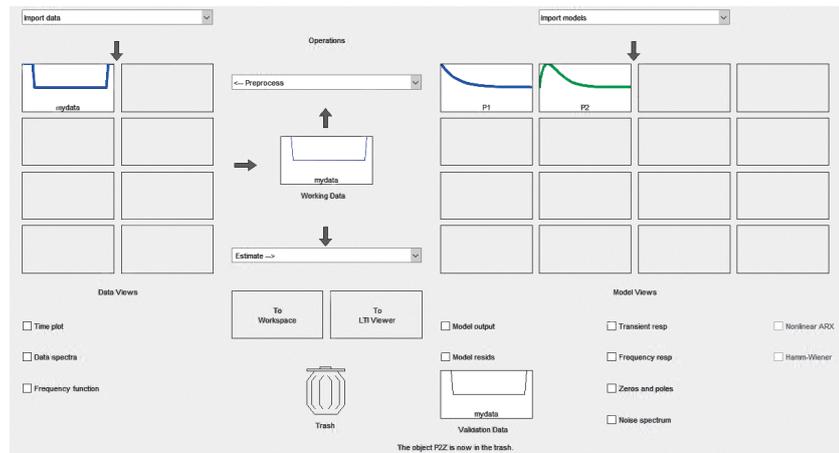


Figura 5.
Comando IDENT

Fuente:
Valladolid et al. 2016

Con el cual se obtiene una función de transferencia de primer orden con factor de aproximación del 82,69% y para un modelo de segundo orden, una aproximación del 91,37%. Como se indica en la Figura 6.

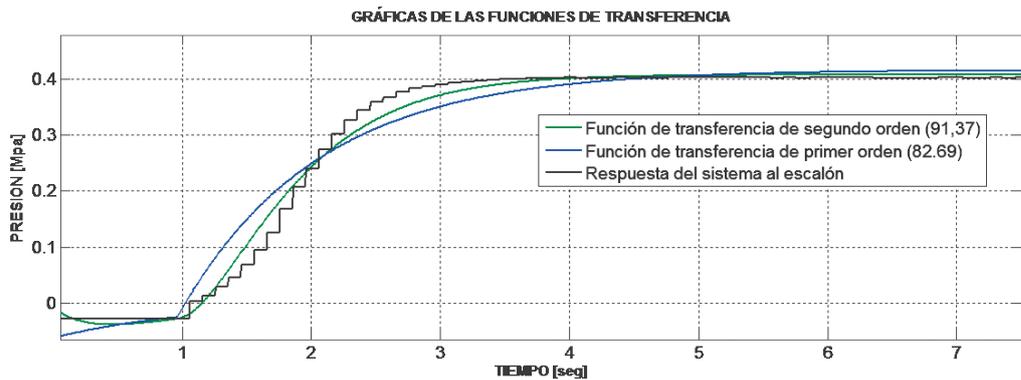


Figura 6.
Modelos matemáticos obtenidos

Fuente:
Valladolid et al. 2016

Por lo que se elige el modelo de segundo orden por la mayor proximidad de datos que se obtuvo.

$$G(s) = \frac{0.001602}{0.2508s^2 + 1.002s + 1} \quad (1)$$

Diseño del controlador PID

Para implementar un controlador PID es necesario sintonizar los valores de ganancia (proporcional), tiempo integral (error estado estable cercano a cero) y tiempo derivativo (anticipación al control) de la planta (Gaviño, 2010). En la Figura 7 se plantea el lazo de control para el sistema.

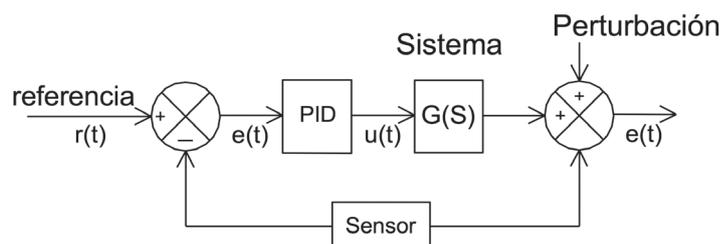


Figura 7.
Lazo de control para el sistema

Fuente:
Valladolid et al. 2016

Método de Ziegler – Nichols

La primera etapa de todo procedimiento de sintonización consiste en obtener la información estática y dinámica del lazo. Se ajustarán los parámetros de controladores PID, con el método de Ziegler y Nichols (Dorf, 2010).

El Método consiste en obtener la respuesta de la señal medida a una perturbación con controlador proporcional. Se observa la respuesta y si es amortiguada, se incrementa la ganancia hasta lograr Oscilaciones Sostenidas (oscilación con amplitud constante). Los valores recomendados de sintonización son:

CONTROLADOR	K_p	T_i	T_d
P	$K_u / 2$	∞	0
PI	$K_u / 2$	$\tau_u / 1.2$	0
PID	$K_u / 1.7$	$\tau_u / 2$	$\tau_u / 8$

Tabla 2.
Fórmulas de Ziegler - Nichols

Fuente:
Richar, Dorf R., 2010

Dónde:

K_u es la ganancia hasta que el sistema oscila con frecuencia constante
 τ_u es el período de oscilación

Se obtienen los siguientes valores para el controlador:

$K_p = 1780, T_i = 2053$ y $T_d = 385,9.$

Diseño del Controlador PD Difuso

Considerando la descripción de la planta realizada anteriormente y conociendo cuál es el comportamiento de la misma, se diseña un sistema difuso en base al conocimiento que se tiene del sistema con respecto al comportamiento de la presión en la planta, mediante el cual se pudiese controlar la presión del combustible en el motor. Para ello, se emplea un controlador que recibe como entradas el error $e(t)$ definido como la diferencia entre la presión deseada y el medido; y la derivada del error $de(t)/dt$. Este controlador entrega una salida en porcentaje de PWM. La arquitectura del sistema se presenta en la Figura 3.

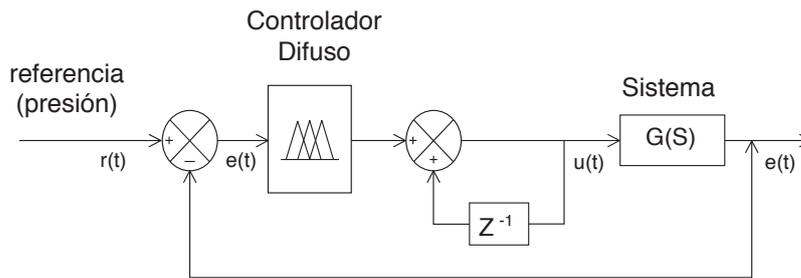


Figura 8.
Estructura del controlador difuso

Fuente:
Valladolid et al. 2016

Difusificación

La difusificación es el proceso de conversión de las variables de entrada en términos lingüísticos también conocidas como funciones de pertenencia. Los términos lingüísticos de las funciones de pertenencia del controlador difuso, están dadas como: muy negativo (MN), negativo (N), cero (Z), positivo (P) y muy positivo (MP) como se muestra en la Figura 9.

Las funciones de membresía del error se muestran en la Figura 9a para las cuales se establecen valores entre -0.4 y 0.3 debido a que por la ubicación del setpoint, no será posible que el error supere estos valores. Para la variación del error (Figura 9b) se establece un rango de ± 100 debido a los cambios bruscos en las pendientes del error, de esta manera el sistema debe reaccionar rápidamente para llevar la salida al punto de referencia, en donde se mantendrá lo más próximo a cero con mínimas variaciones. Las funciones de pertenencia para la salida del controlador se muestra en la Figura 9c, en donde se establece un rango de ± 20 , para aumentar o disminuir el porcentaje de PWM respectivamente.

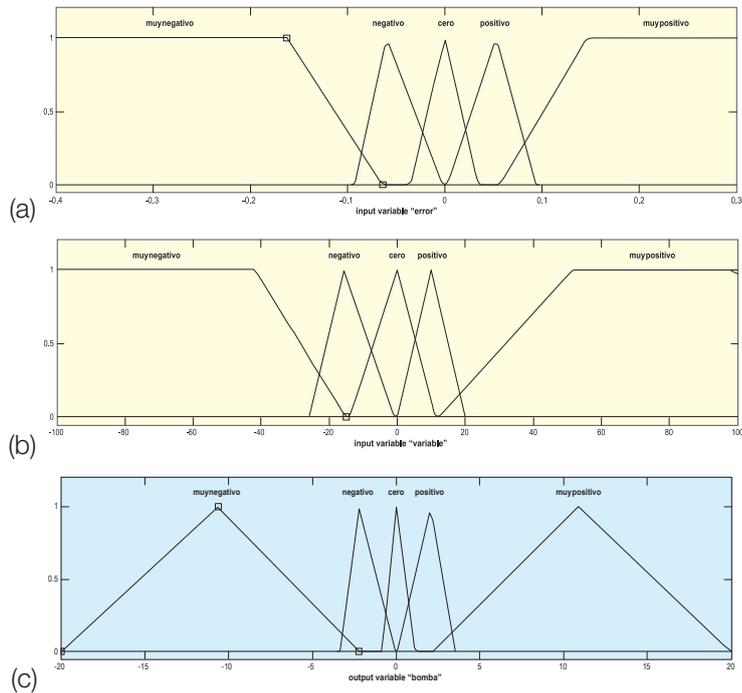


Figura 9.
 (a) Función de membresía para el error, (b) Función de membresía para la derivada del error, (c) Función de membresía para la salida del controlador

Fuente:
 Valladolid et al. 2016

Interferencia difusa

Las reglas son el conjunto de instrucciones que se utilizan para controlar el sistema, que en este caso es como se muestra en la Tabla 3. En donde se realiza de la siguiente manera: “si el error es positivo (valor medido de la presión por debajo de la referencia) y la derivada del error es negativa (el valor medido de presión va en aumento), entonces la salida debe ser cero” lo que implica que el PWM de salida va a tener un aumento mínimo definido en los valores de la función de pertenencia cero.

Tabla 3.
 Reglas de control

Fuente:
 Valladolid et al. 2016

		ERROR (e)				
		MP	P	0	N	MN
Derivada del error $\frac{de}{dt}$	MP	MP	MP	P	P	Z
	P	MP	P	P	Z	N
	0	P	P	Z	N	N
	N	P	Z	N	N	MN
	MN	Z	N	Z	MN	MN

Desdifusificación

La desdifusificación es la última parte del sistema de control difuso, donde convierte las funciones de pertenencia a valores numéricos, de manera que el control se puede lograr con un mejor rendimiento. En la Figura 10 se ilustra la superficie del sistema de control difuso para las diferentes salidas en función de las 2 señales de entrada, además se observa la simetría que existe entre cada una de las entradas con la salida.

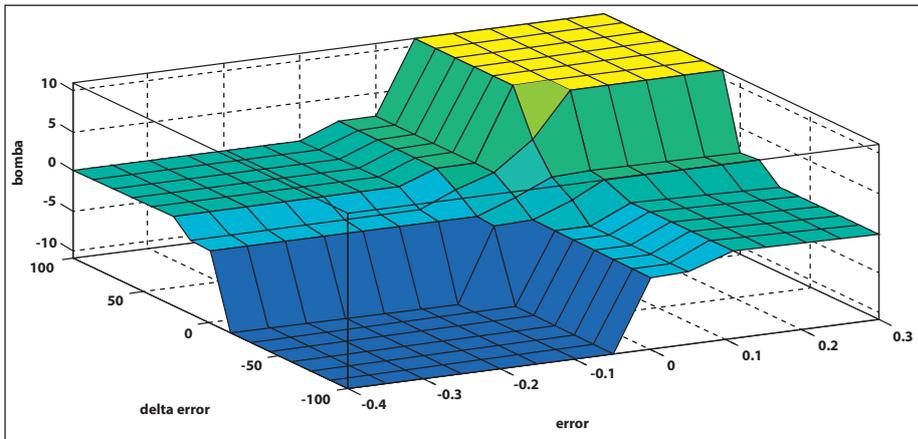


Figura 10. Superficie del control difuso

Fuente: Valladolid et al. 2016

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de desempeño se presenta el comportamiento del sistema con el controlador PID y con el controlador difuso para diferentes puntos de operación. En un primer caso, se muestra el motor encendido y con una señal de referencia de 0.3 Mpa. En la Figura 11 se puede observar el comportamiento del sistema con el controlador PID, mientras que en la Figura 12 se observa el comportamiento del sistema con el controlador difuso.

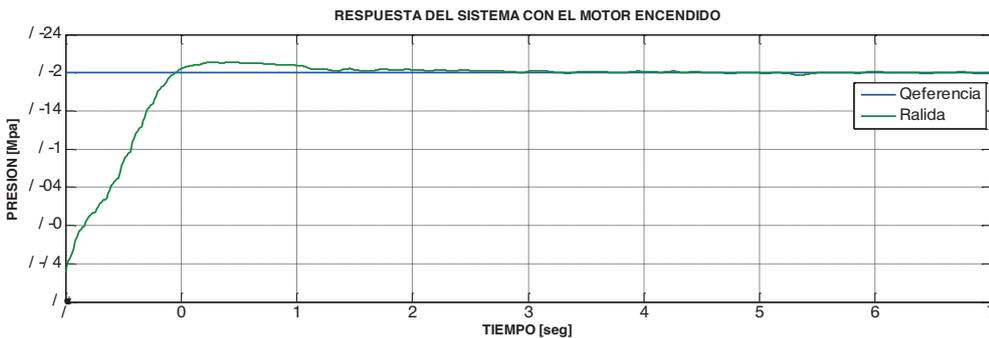


Figura 11. Comportamiento del sistema con el controlador PID.

Fuente: Valladolid et al. 2016

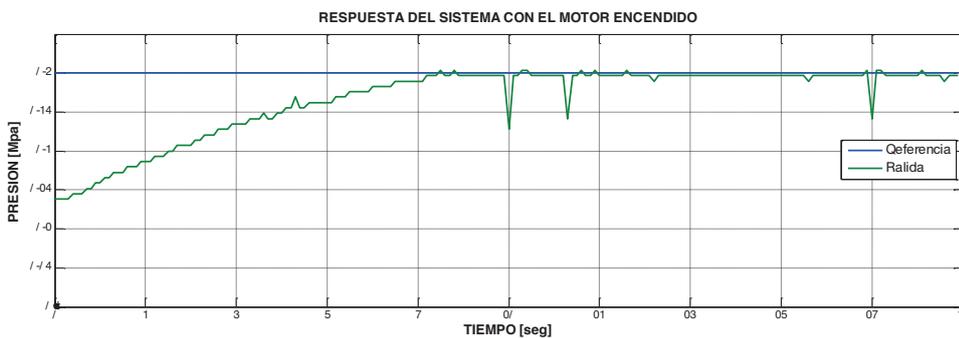


Figura 12. Comportamiento del sistema con el controlador difuso.

Fuente: Valladolid et al. 2016

Como se observa en la Figura 11 el sistema posee un sobre impulso, pero en cuanto al tiempo de respuesta se logra estabilizar en un tiempo aceptable. Al comparar con la Figura 12 el tiempo para alcanzar la referencia es mayor pero la ventaja es que no presenta un sobre impulso, demostrando una mejor adaptabilidad del controlador difuso a la dinámica del sistema. La Figura 13a muestra el error que presenta el motor con el controlador PID, el cual es significativo en el sobre impulso al existir un error negativo que no es conveniente para el sistema, mientras que en la Figura 13b con el controlador difuso se tiene picos que fueron causados por pequeñas perturbaciones que se presentaron en el sistema.

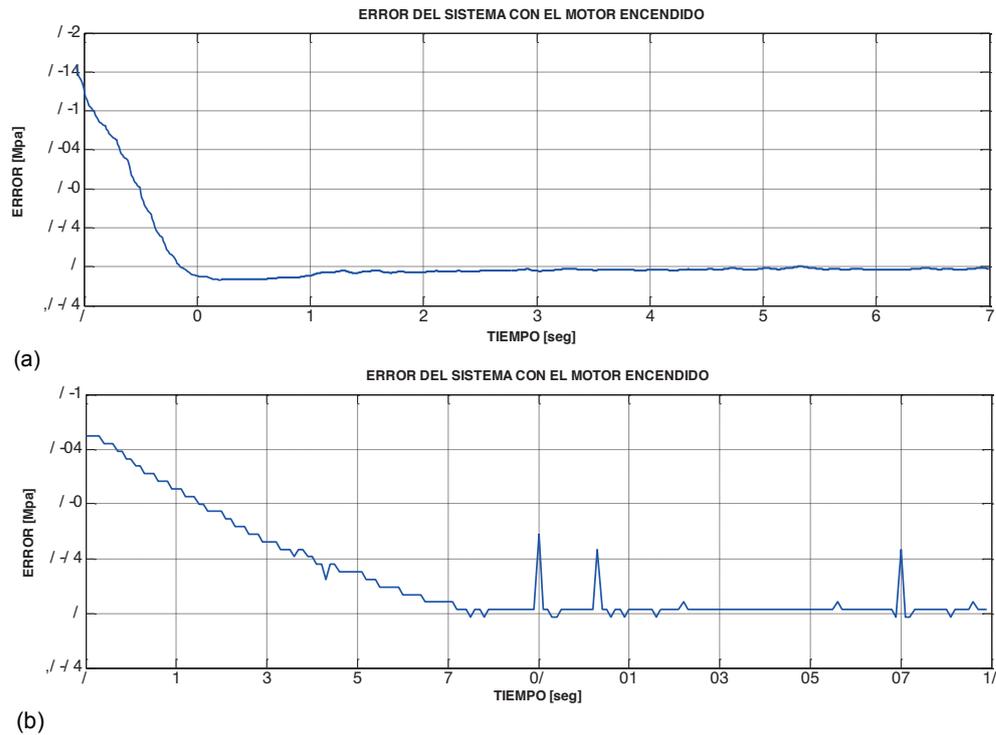


Figura 13.
(a) Error del sistema con el controlador PID. (b) Error del sistema con el controlador difuso.
Fuente:
Valladolid et al. 2016

Cuando el sistema presenta una perturbación, el controlador PID tiene un tiempo aproximadamente de 5 segundos para estabilizarse como se puede observar en la Figura 14, mientras que con el controlador difuso cuando existe una perturbación el tiempo de recuperación es de 3 segundos como se puede observar en la Figura 15.

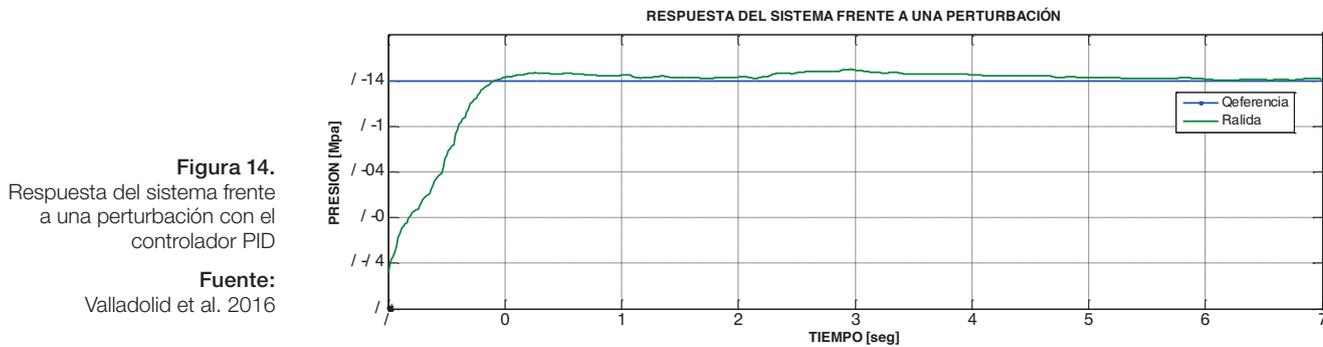


Figura 14.
Respuesta del sistema frente a una perturbación con el controlador PID
Fuente:
Valladolid et al. 2016



Figura 15.
Respuesta del sistema frente a una perturbación con el controlador difuso.
Fuente:
Valladolid et al. 2016

En las Figuras 16 y 17 se puede observar el comportamiento del error frente a perturbaciones, confirmando un mejor desempeño en el controlador difuso.

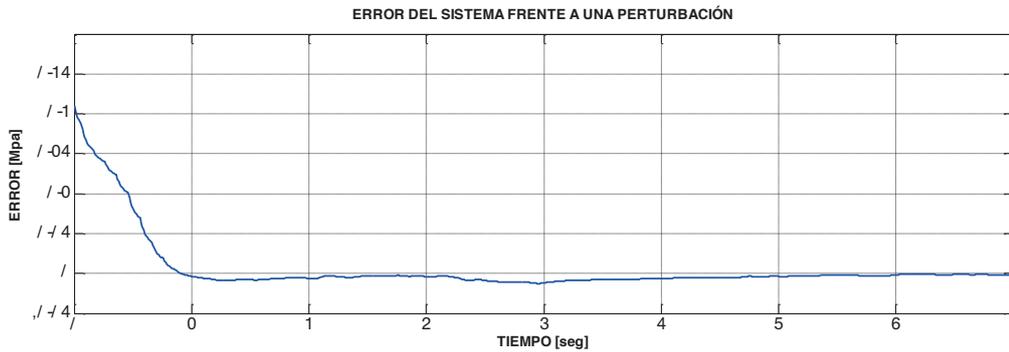


Figura 16. Error del sistema frente a una perturbación con el controlador PID.

Fuente: Valladolid et al. 2016

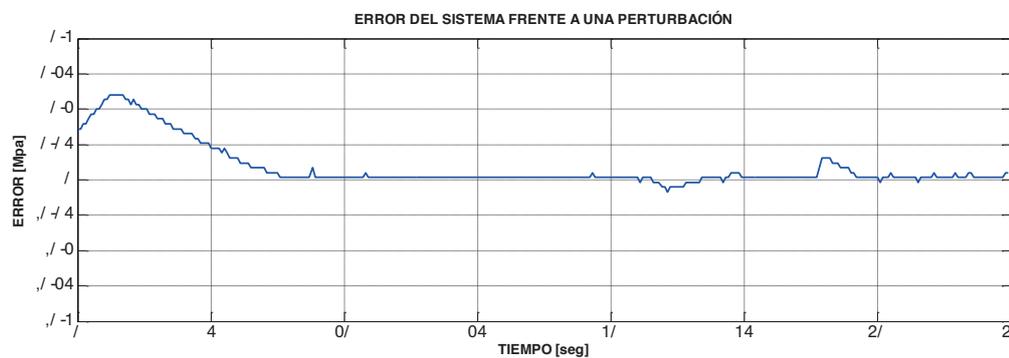


Figura 16. Error del sistema frente a una perturbación con el controlador difuso.

Fuente: Valladolid et al. 2016

CONCLUSIONES

Al aplicar las técnicas de control clásico como es el caso del controlador PID es necesario conocer el modelo matemático de la planta, dependiendo del sistema en el que se trabaje esto puede resultar complejo, ya que las aproximaciones del modelo de la planta pueden no representar correctamente su comportamiento dinámico en todos los puntos de operación debido a las no linealidades presentes en el sistema físico.

El método difuso presentado en esta investigación no requiere de un modelo matemático de la planta lo que facilita en gran medida el proceso de diseño del controlador difuso, sin embargo, es necesario tener un conocimiento previo del funcionamiento del sistema para la implementación de la base de conocimiento y las reglas de inferencia del controlador.

El análisis de desempeño del controlador difuso muestra algunas ventajas importantes sobre el controlador PID, así la recuperación de la presión de combustible del motor ante las perturbaciones externas no mantenidas es de apenas 3 segundos en contraposición de los 8 segundos del PID. Este comportamiento permite tener una mayor eficiencia y mejor respuesta en los sistemas de un vehículo en donde permanentemente existen perturbaciones externas de distinta índole. El principal aporte del controlador difuso implementado radica en su capacidad de ajustarse a las no linealidades del sistema, para esto se estableció cinco funciones de membresía para las entradas, así como para la salida del controlador que garantizan el correcto funcionamiento del sistema.

REFERENCIAS

Crouse, W. H. (1993). *Mecánica del Automóvil*. España: McGraw-Hill, Inc.

Dorf, R. (2010). *Sistemas de Control Moderno*. Madrid: Pearson.

Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. México: Pearson Education.

Lemus, C. G. (2011). *Metodología para la implementación de un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno*. Conciencias.

- Mathworks, C. (2016).
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderno*. Madrid: Pearson Education.
- Olvera, J. (2011). *Tabla de Presiones de Bomba de Gasolina*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/64869564/Tabla-de-Presiones-de-Bomba-de-Gasolina>
- Ramanathan, P. (2014). Fuzzy Logic Controller for Temperature Regulation Process. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 5.
- Ramaniya, A., & Suprijadi. (2009). *A Simulation of Fuzzy Logic Based Fuel Control Unit on Aircraft Engine System*. J.Oto.Ktrl.Inst, 6.
- Rodríguez, J. R. (2014). *Importancia de la presión de combustible*. Recuperado de <http://motoresymas.com/sitio/edicion-no-71/la-importancia-de-una-presion-de-combustible-correcta/>
- Serrano, F. (2011). *Sistema de alimentación de combustible*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/56001647/12/FUNCIONAMIENTO>
- Sudha, G. (2012). *Performance Based Comparison Between Various Z-N Tuning PID And Fuzzy Logic PID*. International Journal on Soft Computing, 12.
- Zulkifli, M. Z. (2014). *Electric fuel pump controller system for retrofit Efi motorcycle*. University Teknologi Malaysia.
- Velarde, I. y Daniele, J. (2006). *La construcción social de productos patrimoniales: conflictos del proceso de innovación y de su valorización económica*. III Congreso Internacional de la Red SIAL "Alimentación y Territorios". Pp. 28. Baeza (España). Recuperado el 6 de octubre de 2012 de <http://www.rimisp.org/getdoc.php?docid=6496>