

Implementation of a Direct Fuzzy Controller Applied to a Helicopter with one Degree of Freedom

J. Rodriguez, *Member, IEEE*, and J. Cote

Abstract—Conventional PID controllers are used in linear processes, showing an appropriate performance and simple tuning methods, however, in non-linear processes with changes in the set-point their response is degraded. In recent decades, the use of fuzzy controllers has increased, due its non-linear behavior and an accurate model of the process is not required. In this document, a new model-based tuning methodology is implemented, which has only been tested in a simulation environment and consists in the calculation of the scale factors of the controller from the parameters of the dynamic response of the system. The tuning method was applied to an one degree of freedom helicopter through a direct fuzzy controller. The platform implemented was tested against changes in the set-point and rejection of disturbances. The performance of controllers was measured through the ITAE and IAE performance indexes. The results of implementation and tests shown a better performance of the fuzzy controller regarding the conventional PID controller without complex computational intelligence algorithms or extensive trial and error methods for tuning.

Index Terms— Direct FLC, Non-linear systems, PID, Scale factors, Tuning.

I. INTRODUCCIÓN

LOS controladores PID (Proporcional, Integral Derivativo) son ampliamente utilizados en el ámbito industrial, debido a que presentan un buen desempeño y facilidad de sintonización de sus parámetros [1]. Aunque han sido reportados múltiples métodos de sintonización para este tipo de controladores [2], su principal desventaja es la degradación en el desempeño temporal cuando son utilizados en sistemas no lineales que requieren cambios en el setpoint (SP), lo anterior debido a la naturaleza lineal del controlador. Por consiguiente, surge la necesidad de utilizar técnicas de control no lineal para este tipo de sistemas.

Se han propuesto múltiples métodos de control de naturaleza no lineal, entre ellas el control difuso, este al igual que el PID convencional funciona con base al comportamiento del error y su estructura es similar, por lo tanto, puede utilizarse para reemplazar el controlador PID en el lazo de control.

El Controlador Lógico Difuso (FLC), se basa en lógica difusa, componiéndose de tres partes: fusificación, en este módulo se convierte los datos numéricos en valores lingüísticos, la base de reglas que relaciona las salidas con las entradas generando un comportamiento no-lineal mediante relaciones de composición (inferencia) y por último la defusificación en donde se convierte los valores difusos a valores numéricos [3].

Los FLC presentan algunas características como, un desempeño adecuado en el control de procesos no lineales, no requieren un modelo matemático preciso del sistema a controlar y flexibilidad paramétrica para su sintonización [3]. En la literatura existen algunos métodos de sintonización para FLC desde un enfoque por prueba y error [4]–[6], sintonizando el controlador difuso a partir de cambios paramétricos en las funciones de pertenencia (MFs), mecanismo de inferencia, factores de escala, entre otros. Este tipo de enfoque presenta debilidades debido a la gran cantidad de parámetros que es necesario ajustar y el tiempo que esto requiere.

En contraste, algunos trabajos como [7]–[9] proponen un conjunto de ecuaciones para obtener los factores de escala del FLC a partir de las ganancias del controlador PID, es decir se trata de metodologías que permiten obtener un FLC equivalente al PID convencional. Posterior a esto los autores proponen una segunda sintonización mediante variaciones en los factores de escala y la superficie de control con el objetivo de ajustar el FLC al comportamiento no lineal del sistema que se está controlando, lo cual implica una serie de pruebas y conocimiento del comportamiento del sistema.

Así mismo, se han reportado métodos de sintonización que usan técnicas de inteligencia computacional como en [10] en donde se hallan los valores de los factores de escala del FLC a partir de la minimización de una función de costo, mientras que en [11]–[17] se utilizan técnicas como redes neuronales artificiales para el diseño del controlador, lo cual puede resultar en un manejo matemático e implementación de algoritmos extensos en la mayoría de los casos.

Por otro lado, los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle UAV) han tomado relevancia en la última década y por consiguiente las exigencias de control para este tipo de sistemas van en aumento. Es frecuente el uso de plataformas aéreas de uno y dos grados de libertad, las cuales son flexibles, de bajo costo y adecuadas para evaluar el desempeño de tareas de control propias de este tipo de vehículos aéreos, debido a que su comportamiento es no lineal y su SP cambia varias veces durante el tiempo de operación, por ende, un controlador PID convencional puede llegar a ser insuficiente.

E. Rodriguez, Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI), Bogotá, Colombia (jdrodriguez@ecc.edu.co).

J. E. Cote, Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI), Bogotá, Colombia (jecoteb@ecc.edu.co).

Teniendo en cuenta lo anterior, los FLC pueden ser una solución para tratar este problema. Por ejemplo en [18] se diseña el FLC para el control del ángulo vertical del brazo, se utiliza un controlador FPD+I (Acción proporcional derivativa difusa + acción integral), modificando la base de reglas y la salida del sistema difuso a través de un integrador, la definición de los universos de discurso y los valores de los factores de escala se obtienen empíricamente. Mientras que en [19] se propone un FLC con tres variables de entrada estas son: referencia, error de ángulo de elevación y la derivada del error del ángulo de elevación, como salida la acción de control, pero tanto la forma de las MFs, la cantidad de conjuntos difusos y la definición de los universos de discurso se obtuvieron bajo simulaciones y experimentación. En [20] se diseña un FLC de tipo PD, las entradas al sistema difuso son el error y la derivada y la salida la acción de control, se utilizan 25 reglas, no se reporta información sobre la ubicación de las MFs, además no se realizan pruebas en diferentes puntos de operación.

En el presente documento se realiza un análisis de desempeño de un FLC directo con respecto a un controlador PID convencional, en procesos donde los cambios en el punto de operación hacen evidente la presencia de no linealidades en el comportamiento del sistema. Esta comparación es posible debido a que el FLC se ubica dentro del lazo de realimentación reemplazando el PID convencional. El análisis se realiza a través de un helicóptero de un grado de libertad para controlar su ángulo de elevación. Adicionalmente, se implementa por primera vez en una planta física un FLC directo sintonizado a través del método propuesto en [21], en el cual se propone una metodología sencilla, basada en modelo donde es posible calcular los factores de escala del FLC a partir de las ganancias del PID convencional y las ganancias estáticas de los submodelos lineales del proceso. La sintonización del controlador PID convencional se realiza por medio del método IMC, para lo cual el parámetro λ (constante del filtro paso bajo) debe garantizar que la función de transferencia del controlador sea propia [22]. El análisis de los controladores se evalúa a través de medidas de desempeño del error como IAE e ITAE ante cambios en la referencia y perturbaciones a la salida. Para la implementación de los controladores se eligió como plataforma de control el software Labview utilizando la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments NI 6008.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se realiza una presentación sobre la metodología utilizada en la sintonización del FLC, en la sección 3 se describe el proceso de implementación, en la sección 4 análisis de resultados, finalmente en la sección 5 se presentan conclusiones.

II. ARQUITECTURA DEL FLC Y SINTONIZACIÓN

La arquitectura del FLC FPD+I se presenta en la Fig. 1, en donde las entradas al sistema difuso son el error (e) multiplicada por un factor de escalamiento GE y la primera derivada del error (Δe) por un factor de escalamiento GCE. A la salida del sistema difuso se le suma con la acción integral del error (Ie), mediante la incorporación de un factor de escalamiento GIE; del resultado de esta suma se obtiene la acción de control (U) a través del factor de escala GU, obteniendo la ecuación:

$$U = GU [GE \cdot e + GCE \cdot ce + GIE \cdot ie] \tag{1}$$

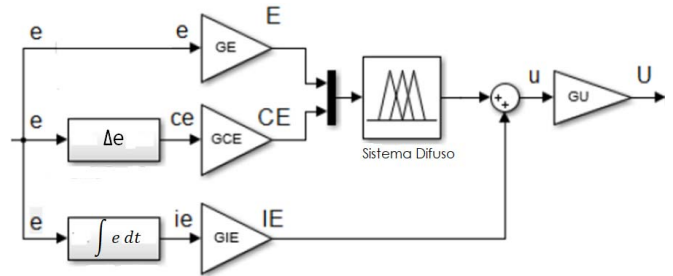


Fig. 1. Arquitectura FPD+I tomada [8].

En el sistema difuso implementado para el FLC las MFs para las entradas (e) y (Δe) son de forma triangular, se utilizan tres conjuntos difusos N, Z y P, las cuales se ubican en un universo de discurso definido entre -100 a 100. Mientras que las MFs de la salida (u) son de forma singleton, se utilizan cinco conjuntos difusos: -200, -100, 0, 100, 200. Estos parámetros se pueden observar en la Fig. 2.

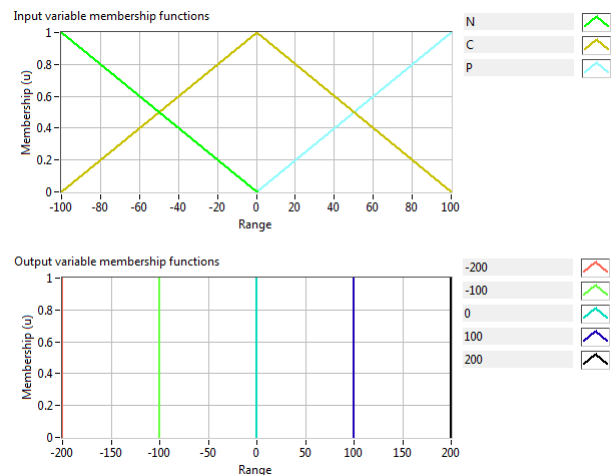


Fig. 2. MFs para las entradas y la salida.

La base de reglas que relaciona las dos entradas con la salida utiliza mecanismo de inferencia Mamdani tal como se observa en la Fig. 3.

1. IF 'ERROR' IS 'N' AND 'DEV ERROR' IS 'C' THEN 'SALIDA' IS '-100'
2. IF 'ERROR' IS 'N' AND 'DEV ERROR' IS 'P' THEN 'SALIDA' IS '0'
3. IF 'ERROR' IS 'C' AND 'DEV ERROR' IS 'N' THEN 'SALIDA' IS '-100'
4. IF 'ERROR' IS 'C' AND 'DEV ERROR' IS 'C' THEN 'SALIDA' IS '0'
5. IF 'ERROR' IS 'C' AND 'DEV ERROR' IS 'P' THEN 'SALIDA' IS '100'
6. IF 'ERROR' IS 'P' AND 'DEV ERROR' IS 'N' THEN 'SALIDA' IS '0'
7. IF 'ERROR' IS 'P' AND 'DEV ERROR' IS 'C' THEN 'SALIDA' IS '100'
8. IF 'ERROR' IS 'P' AND 'DEV ERROR' IS 'P' THEN 'SALIDA' IS '200'
9. IF 'ERROR' IS 'N' AND 'DEV ERROR' IS 'N' THEN 'SALIDA' IS '-200'

Fig. 3. Base de reglas de FLC implementadas en Labview.

A partir de la base de reglas y las MFs para las entradas y la salida se genera la superficie de control de la Fig. 4.

En [21] se proponen cuatro pasos para la sintonización del FLC directo, el cual reemplazará un controlador PID convencional sintonizado en un punto de operación del proceso.

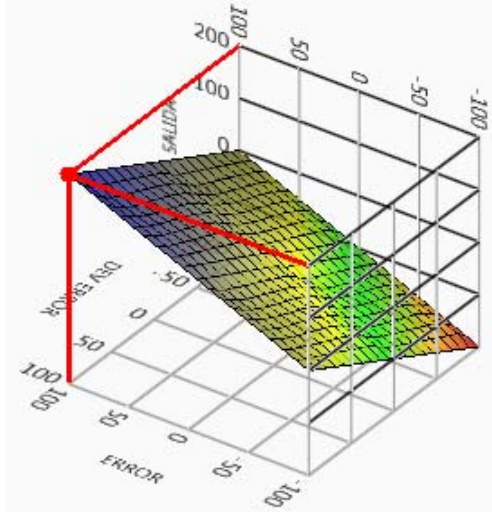


Fig. 4. Superficie de Control.

1) *Primer Paso*

Obtener los submodelos lineales en diferentes puntos de operación por medio de pruebas de curva de reacción del proceso en lazo abierto.

2) *Segundo Paso*

Calcular el coeficiente K_f , por medio de (2), que relaciona las ganancias estáticas de los sub-modelos lineales en el punto de operación más alto (K_s) y más bajo (K_i), a través de las curvas de reacción en lazo abierto, por lo tanto, esta metodología aplica particularmente a procesos auto-regulados.

$$K_f = K_i / K_s \quad (2)$$

3) *Tercer Paso*

Realizar una pre-sintonización del FLC a partir de las ganancias del controlador PID convencional que va a ser reemplazado, con el fin de obtener como punto inicial una acción de control equivalente entre ambos controladores. Esto se realiza por medio de las siguientes ecuaciones propuestas en [8] y que han sido aplicadas en [23], [24]:

$$GE = 100 \quad (3)$$

$$GU_n = k_p / GE \quad (4)$$

$$GCE_n = T_d \cdot GE \quad (5)$$

$$GIE_n = GE / T_i \quad (6)$$

4) *Cuarto Paso*

Se calculan los valores de los factores de escala finales a partir del parámetro K_f obtenido en el paso 2, con el fin de realizar una sintonización fina del FLC directo, a través de las ecuaciones siguientes:

$$GU = GU_n \cdot K_f \quad (7)$$

$$GCE = GCE_n \cdot 0.5 \quad (8)$$

$$GIE = GIE_n \quad (9)$$

III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA

A. *Diseño de la Plataforma*

La plataforma de pruebas consiste en un helicóptero de un grado de libertad que permite el movimiento en el eje "y", lo cual se traduce en el cambio del ángulo de elevación, también conocido como el movimiento "pitch". La construcción fue realizada en acrílico para conseguir una condición de peso liviano, teniendo en cuenta que el helicóptero estará realizando la variación del ángulo de elevación, en función de la velocidad con la que gire el motor. También se equilibra la parte trasera para que ejerza un contrapeso y de esta manera facilitar su elevación. La Fig. 5, muestra el resultado final de la construcción de la plataforma la cual presenta una altura de 0.3 m y el helicóptero tiene una longitud de 0.295 m; las hélices tienen una envergadura de 0.055 m y el eje de giro está ubicado a 0.15 m de la parte frontal del vehículo aéreo. El ángulo de elevación cambia en un rango desde -65° hasta 60° , con respecto a la horizontal.

La medición del ángulo de elevación fue realizada con un potenciómetro lineal de $5k\Omega$, el cual fue acondicionado con una sensibilidad de $30^\circ/V$ y un error absoluto de $\pm 0.1\%$ con respecto a un medidor electrónico basado en giroscopio. Como actuador fue seleccionado un motor DC ultraliviano con voltaje nominal de operación de 5 V y corriente máxima de 1 A.



Fig. 5. Plataforma construida de helicóptero de un grado de libertad.

B. *Identificación del Sistema: Helicóptero de un Grado de Libertad*

La sintonización se realiza a partir de la identificación de los sub-modelos lineales en diferentes puntos de operación indicados en la Fig. 6, los cuales corresponden a 6 escalones dentro del rango de operación de la planta. En contraste el rango de salida para el sensor/transmisor es entre 0 V a 1.78 V; todos los sub-modelos son caracterizados como sistemas de primer orden más tiempo muerto a través del método Smith [25], buscando que el método de sintonización del FLC sea similar al de un PID convencional.

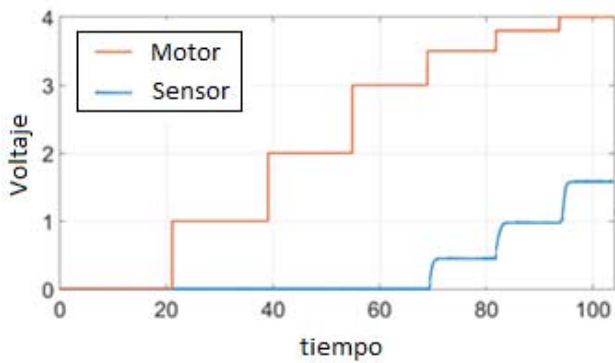


Fig. 6. Curvas de reacción obtenidas.

Los sub-modelos lineales obtenidos son:

$$G_i(s) = \frac{1.98 \cdot e^{-0.21s}}{2.1 \cdot s + 1} \tag{10}$$

$$G(s) = \frac{3.94 \cdot e^{-0.38s}}{2.35 \cdot s + 1} \tag{11}$$

$$G_s(s) = \frac{4 \cdot e^{-0.4s}}{2.4 \cdot s + 1} \tag{12}$$

C. Diseño y Construcción de Controladores en LabView

1) Sintonización de controlador PID convencional

A partir de los modelos obtenidos en la identificación se procede a realizar la sintonización de un controlador lineal PID, bajo la técnica de control por modelo interno (IMC) [26], frecuentemente utilizado en la industria porque tiene consideraciones de robustez frente a la discrepancia entre el modelo y el proceso real. Las ecuaciones de sintonización son:

$$K_p = \frac{\tau + 0.5 \cdot t_0}{K(\lambda + 0.5 \cdot t_0)} \tag{13}$$

$$T_i = \tau + 0.5 \cdot t_0 \tag{14}$$

$$T_d = \frac{\tau \cdot t_0}{2 \cdot \tau + t_0} \tag{15}$$

Donde t_0 y τ corresponden a los parámetros de tiempo muerto y la constante de tiempo respectivamente, así mismo, K es la ganancia estática procedentes de la identificación de los modelos presentados en (10)-(12); λ es el parámetro del filtro pasa-bajo para el ajuste de la ganancia proporcional. Para este caso el controlador PID se diseña con los datos del modelo obtenido en (10), ya que este permite una variación amplia de los valores de los factores de escala en el FLC en función del rango de trabajo del proceso, tratando de evitar saturación en la acción de control, los valores obtenidos son:

$$K_p = 3.53$$

$$T_i = 2.20$$

$$T_d = 0.10$$

2) Sintonización del FLC

A partir de las curvas de reacción presentadas en la Fig 6. el parámetro K_f obtenido para la plataforma del helicóptero de 1 grado de libertad es:

$$K_f = 0.495$$

La pre-sintonización obtenida para el FLC a partir de los parámetros del controlador PID convencional son:

$$GU = 0.0353$$

$$GIE = 45.45$$

$$GCE = 10$$

Los factores de escala obtenidos para el FLC PID teniendo en cuenta las ecuaciones (7) a la (9) son:

$$GU = 0.017$$

$$GIE = 45.45$$

$$GCE = 5$$

La implementación de los controladores, tanto el PID convencional como el FLC, fue realizada en el software Labview, utilizando la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI 6008. La comunicación fue realizada a través de la librería NIDAQ1760F2. El SP fue implementada por medio de un “set point profile” que introduce varios escalones con el fin de variar el punto de operación de la plataforma y permite la incorporación de perturbaciones al sistema. Adicionalmente, a la salida del controlador se implementaron bloques de saturación para limitar la salida al rango de operación de la tarjeta DAQ (0V – 5V).

Fue configurada una interfaz de usuario con un control numérico para modificar las ganancias del PID o del FLC, gráficas de tendencia y una tabla para observar y almacenar la acción de control, la referencia y la salida en tiempo real, además un indicador de aguja para mostrar la salida del sistema. En la Fig. 7, es posible apreciar una captura de la interfaz diseñada.

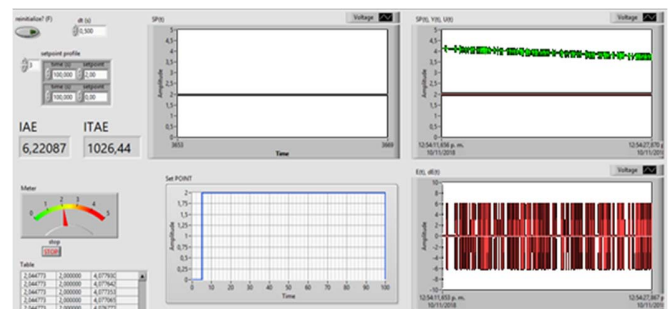


Fig. 7. Interfaz de usuario FLC PID.

La conexión de los controladores implementados en Labview y la plataforma se realizó tal como se muestra en la

Fig. 8, donde la tarjeta DAQ es la interfaz entre la plataforma y el software, la cual entrega una salida analógica que ingresa a una etapa que genera una señal modulada por ancho de pulso (PWM) para variar la velocidad del motor en función del voltaje entregado por la tarjeta DAQ. La señal del sensor ingresa a una entrada de la tarjeta DAQ para que el software pueda procesar esta información procedente del helicóptero.

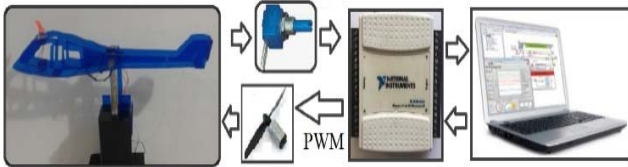


Fig. 8. Diagrama de bloques de arquitectura implementada.

En el software Labview también se implementaron bloques para realizar las operaciones de integral y derivada mediante aproximaciones discretas de Euler; lo anterior con el fin de establecer las ganancias proporcional, integral y derivativa en el caso de los controladores PID y la integral y derivada del error en el caso de los FLC como se muestra en las Figs. 9 y 10. Las constantes que ingresan a los bloques “integrator” y “derivator” corresponden a las ganancias del PID convencional presentado en la Fig 9. Mientras que en la Fig. 10 se observa que las ganancias del controlador están marcadas como GE, GIE y GCE.

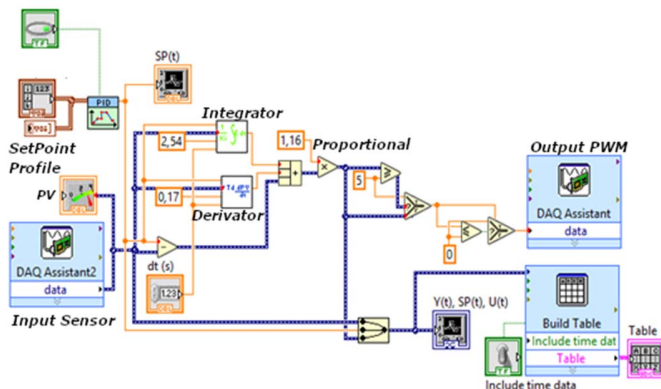


Fig. 9. Programa implementado para el controlador PID.

Para la implementación del sistema difuso del FLC se utilizó el bloque difuso nativo de Labview, el cual fue configurado con el sistema difuso presentado en la sección 2 y se muestra en la Fig. 10.

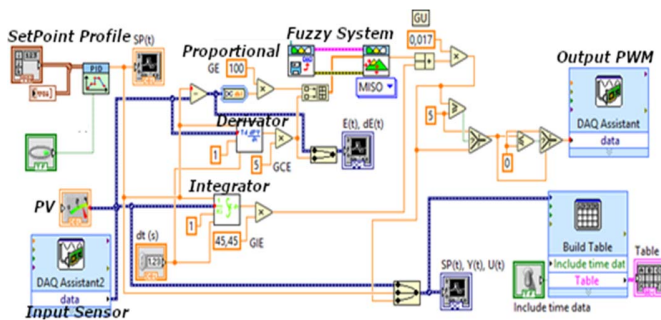


Fig. 10. Programa implementado para el FLC.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Pruebas de Desempeño

Los controladores diseñados e implementados han sido sometidos a pruebas de desempeño, como seguimiento a referencias que cambian su punto de operación, con el fin de evaluar la respuesta de los controladores con respecto a la no linealidad del sistema, también fueron realizadas pruebas de rechazo a perturbaciones introduciendo una perturbación tipo escalón.

El “set point profile” para la tarea de seguimiento a referencias, fue programado con cuatro funciones escalón que incrementan la amplitud en 30°, por lo tanto, se realiza una variación del ángulo de elevación desde -65° hasta 55°, rango de operación para el cuál se observa no linealidad en el sistema ante cambios en la entrada, tal como se evidencia en la Fig. 6.

Adicionalmente se realizaron pruebas agregando perturbaciones para ambos casos entre la salida de los controladores y la entrada de la planta, las cuales fueron ingresadas por software con el fin de que estas sean iguales para ambos controladores, transcurridos 60 segundos del experimento con una amplitud de 30°. En las Figs. 13 y 14, se observan los resultados del rechazo a perturbaciones por parte de cada uno de los controladores implementados.

B. Análisis de Resultados

1) Seguimiento a referencias en diferentes puntos de operación

En las Figs. 11 a 14 se observan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, utilizando el controlador PID convencional y el FLC directo respectivamente. En ambas gráficas la señal de color rojo corresponde a la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema y por consiguiente la señal amarilla es la acción de control aplicada a la planta.

La respuesta del controlador PID convencional se puede observar en la Fig. 11. La salida del sistema presenta un tiempo de establecimiento mayor en el primer escalón con respecto al FLC y sobre-impulso en los puntos de operación más altos, situación que disminuye notablemente en el caso de los FLC, tal como se puede apreciar en la tabla 1 por medio de los índices ITAE e IAE, donde el FLC presenta una mejora en el desempeño aproximadamente del 60% mejor con respecto al controlador PID convencional. En la Fig. 12, se observa que la respuesta del FLC es más uniforme en todo el rango de operación del helicóptero de un grado de libertad.

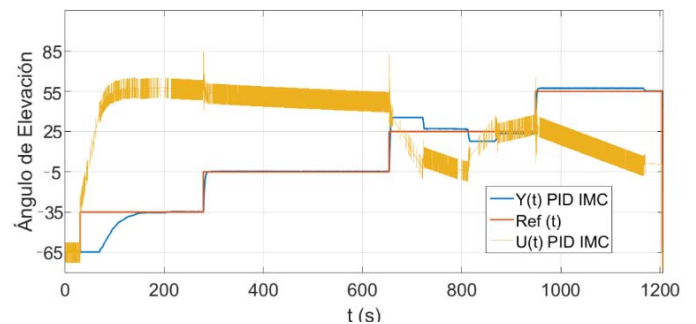


Fig. 11. Respuesta temporal del PID convencional ante variaciones en la referencia.

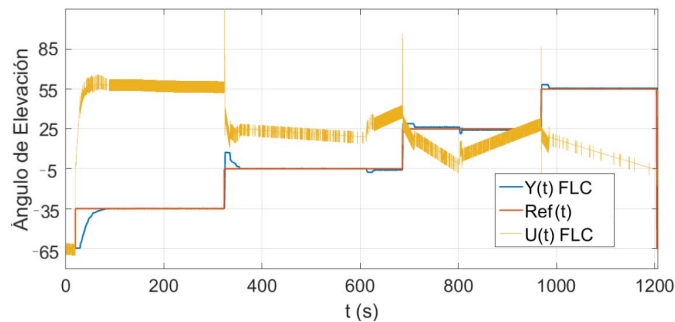


Fig. 12. Respuesta temporal del FLC ante variaciones en la referencia.

2) Rechazo a perturbaciones

En la Fig. 14, se observa que el FLC realiza un rechazo a la perturbación introducida, en menor tiempo que el controlador PID convencional, debido a que el FLC realiza una acción de control de mayor magnitud que el PID convencional.

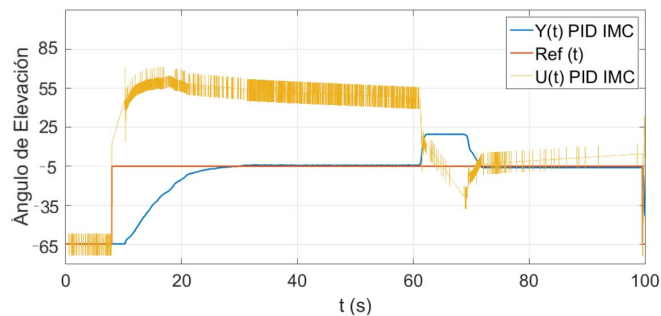


Fig. 13. Respuesta temporal del PID convencional ante perturbaciones.

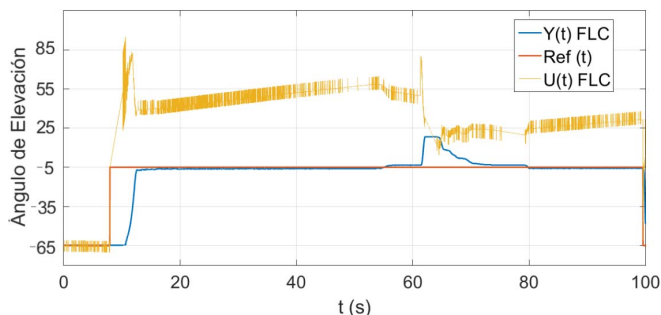


Fig. 14. Respuesta temporal del FLC ante perturbaciones.

3) Índices de desempeño

Para analizar el desempeño de los controladores implementados, se utilizaron los siguientes índices de medición: Integral del error absoluto (IAE) e Integral del error absoluto por el tiempo (ITAE).

TABLA I
ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Controlador	PID IMC	FPD+I
IAE	19.522	11.739
ITAE	23525	14146.51

Los índices de desempeño de los controladores desarrollados, los cuales se pueden apreciar en la tabla 2

muestran que el FLC mejora significativamente el comportamiento del sistema con respecto al controlador PID convencional cuando se aplican perturbaciones en el sistema de lazo cerrado.

TABLA II
ÍNDICES DE DESEMPEÑO CON PERTURBACIONES

Controlador	PID IMC	FPD+I
IAE	12.571	7.266
ITAE	2074.22	1199.03

V. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de la implementación de los controladores PID convencional y FLC directo se llegó a las siguientes conclusiones:

La metodología de sintonización utilizada para los FLC [21] se pudo aplicar de manera sistemática puesto que depende directamente de los parámetros del modelo de la planta, sin necesidad de recurrir a herramientas de inteligencia computacional o a métodos iterativos de prueba y error hasta lograr el comportamiento deseado.

Por otro lado, al comparar los índices de los controladores implementados se encontró una mejora en el desempeño del sistema con el FLC comparado con el controlador PID convencional, mejorando el IAE e ITAE en aproximadamente el 60%, lo cual ratifica que la naturaleza no lineal de los controladores difusos permite actuar adecuadamente sobre plantas con características altamente no lineales. Así mismo, los FLC presentan una respuesta más uniforme frente a cambios en los puntos de operación comparados con el controlador PID convencional implementado.

Por último, los controladores FLC directos presentan mejores capacidades de rechazo a perturbaciones que los PID convencionales, debido a que el modelo difuso responde en función de la base de reglas, las cuales se activan dependiendo de los niveles de las entradas del controlador y esto genera una acción de control no lineal lo cual permite que se rechacen perturbaciones de una manera más rápida que el PID convencional que está sintonizado para un punto de operación particular y su acción de control es lineal.

Como trabajo futuro, se debe considerar la implementación de este método de sintonización a plataformas industriales y la consideración de procesos con dinámicas más complejas y no linealidades más fuertes, así mismo, el estudio de la estabilidad y la robustez en este tipo de controladores.

REFERENCIAS

- [1] K. Astrom and T. Hägglund, "PID controllers: theory, design and tuning," *Instrument Society of America*. 1995.
- [2] F. Haugen, "Tuning of PID controllers," 2004.
- [3] R. Babuška, "FUZZY AND NEURAL CONTROL DISC Course Lecture Notes (November 2009)," no. November, pp. 55–72, 2009.
- [4] R. F. Liao, C. W. Chan, J. Hromek, G. H. Huang, and L. He, "Fuzzy logic control for a petroleum separation process," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 21, no. 6, pp. 835–845, 2008.
- [5] M. Mahmoud, K. Dutton, and M. Denman, "Design and simulation of a nonlinear fuzzy controller for a hydropower plant," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 73, no. 2, pp. 87–99, 2005.

- [6] A. M. F. Fileti, A. J. B. Antunes, F. V. Silva, V. Silveira, and J. A. F. R. Pereira, "Experimental investigations on fuzzy logic for process control," *Control Eng. Pract.*, vol. 15, no. 9, pp. 1149–1160, 2007.
- [7] P. J. Escamilla-Ambrosio and N. Mort, "A novel design and tuning procedure for PID type fuzzy logic controllers," *2002 1st Int. IEEE Symp.*, vol. 1, no. September, pp. 36–41, 2002.
- [8] J. Jantzen, "Tuning Of Fuzzy PID Controllers," *Tech. Univ. Denmark, Dep. Autom.*, vol. 871, no. 98-H, pp. 1–22, 1998.
- [9] M. Santos, S. Dormido, and de la C. J.M., "Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy-PI Controllers," no. 34, pp. 1598–1604, 1996.
- [10] M. N. Moutinho, C. T. Da Costa, W. Barra, and J. A. L. Barreiros, "Identification, digital control and fuzzy logic techniques applied to a synchronous generator," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 7, no. 2, pp. 141–150, 2009.
- [11] J. de Jesús Rubio, "Discrete time control based in neural networks for pendulums," *Appl. Soft Comput. J.*, 2018.
- [12] W. He and Y. Dong, "Adaptive Fuzzy Neural Network Control for a Constrained Robot Using Impedance Learning," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, 2018.
- [13] J. de J. Rubio, E. Garcia, G. Aquino, C. Aguilar-Ibañez, J. Pacheco, and A. Zacarias, "Learning of operator hand movements via least angle regression to be taught in a manipulator," *Evol. Syst.*, 2018.
- [14] J. J. Martínez, J. A. Padilla Medina, and E. J. J. Rodríguez, "LabVIEW-based Classic, Fuzzy and Neural Controllers Algorithm Design Applied to a Level Control Prototype," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 6, pp. 1154–1162, 2017.
- [15] V. T. Yen, W. Y. Nan, and P. van Cuong, "Recurrent fuzzy wavelet neural networks based on robust adaptive sliding mode control for industrial robot manipulators," *Neural Computing and Applications*, 2018.
- [16] J. R. García-Sánchez *et al.*, "Robust switched tracking control for wheeled mobile robots considering the actuators and drivers," *Sensors (Switzerland)*, 2018.
- [17] J. J. Rubio, "Modified optimal control with a backpropagation network for robotic arms," *IET Control Theory Appl.*, 2012.
- [18] S. Kouro R. and R. Musalem M., "Control Mediante Lógica Difusa," *Técnicas Mod. en Automática*, 2002.
- [19] J. Velagic and N. Osmic, "Design and implementation of fuzzy logic controllers for helicopter elevation and azimuth controls," *Conf. Control Fault-Tolerant Syst. SysTol'10 - Final Progr. B. Abstr.*, pp. 311–316, 2010.
- [20] L. Solaque Guzmán, C. A. Cristancho Cardozo, and C. A. Gil Cárdenas, "Diseño e implementación de una plataforma experimental de dos grados de libertad controlada por dos técnicas: PID y lógica difusa," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 24, no. 1, p. 99, 2014.
- [21] J. E. Rodríguez-Castellanos, V. H. Grisales-Palacio, and J. E. Cote-Ballesteros, "A tuning proposal for direct fuzzy PID controllers oriented to industrial continuous processes," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 657–662, 2018.
- [22] C. E. García Saxena and M. Morari, "Internal Model Control. 2. Design Procedure for Multivariable Systems," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1985.
- [23] R. Manikandan, A. Arulprakash, and R. Arulmozhiyal, "Design of equivalent fuzzy PID controller from the conventional PID controller," *2015 Int. Conf. Control Instrum. Commun. Comput. Technol. ICCICCT 2015*, pp. 356–362, 2016.
- [24] A. A. Khan and N. Rapal, "Fuzzy PID controller: Design, tuning and comparison with conventional PID controller," *IEEE Int. Conf. Eng. Intell. Syst. ICEIS 2006*, no. 1, 2006.
- [25] C. L. Smith, "Digital control of industrial processes," *ACM Comput. Surv.*, 1972.
- [26] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control. 1. a Unifying Review and Some New Results," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1982.



Jhon Edisson Rodriguez Castellanos

Recibió el título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá) en 2013. En 2019 obtuvo el grado de Magister en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Sus áreas de intereses son Control Automático, Control Difuso, Inteligencia Computacional, Robótica.



Jorge Eduardo Cote Ballesteros

recibió el título de Ingeniero electrónico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en 2011. Posteriormente, obtuvo el grado de Magister en ingeniería en la Universidad Nacional de Colombia en el año 2018, ambos en la ciudad de Bogotá. Sus intereses están en el área de control y técnicas de inteligencia computacional aplicadas a la industria.