

Desempeño de controladores difuso y neuro-difuso sobre una planta no lineal inestable

José Jorge Penco
Facultad Regional Concordia
Universidad Tecnológica Nacional
Concordia, Argentina
jpenco@frcon.utn.edu.ar

Mario Roberto Modesti
Facultad Regional Córdoba
Universidad Tecnológica Nacional
Córdoba, Argentina
mmodesti@frc.utn.edu.ar

Resumen—En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el desempeño de funcionamiento, en fase de simulación, de un controlador difuso y de un controlador neuro-difuso, aplicados al control de una planta no lineal e inherentemente inestable como es el dispositivo de bola y plataforma. A partir del modelo matemático del sistema, y mediante la utilización de las herramientas computacionales de Matlab®, se diseñaron ambos controladores empleando la estructura clásica de Mamdani y un sistema de inferencia difusa basado en red adaptiva, o ANFIS, respectivamente. El procedimiento de verificación se realizó mediante la aplicación de consignas de entrada con el objetivo de imprimir a la bola trayectorias circulares y rectangulares sobre la plataforma. La comparación de las respuestas obtenidas por simulaciones muestra ventajas en favor del controlador neuro-difuso, aun considerando la presencia de ruido generado en los sensores y la ocurrencia de eventuales perturbaciones externas.

Palabras clave—control no lineal, sistema de bola y plataforma, controlador difuso, neuro-difuso, simulación.

Abstract—This article presents the results obtained in the performance of a fuzzy controller and a neuro-fuzzy controller in the simulation phase, applied to the control of a non-linear and inherently unstable plant such as the ball and platform device. From the mathematical model of the system, and by using the Matlab® computational tools, both controllers were designed using the classic Mamdani structure and a fuzzy inference system based on adaptive network, or ANFIS, respectively. The verification procedure was carried out by means of the application of input signals in order to print circular and rectangular trajectories on the platform to the ball. The comparison of the responses obtained by simulations shows advantages in favor of the neuro-fuzzy controller, even considering the presence of noise generated in the sensors and the occurrence of possible external disturbances.

Keywords—non linear control, ball and platform system, fuzzy controller, neuro-fuzzy controller, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de bola y plataforma es un dispositivo electromecánico actualmente utilizado en las universidades para el estudio de técnicas clásicas y avanzadas de control. Compuesto por una plataforma plana cuyo único punto de apoyo está ubicado en su centro geométrico y sobre la cual una bola puede rodar libremente constituye un sistema completamente inestable a lazo abierto, ver Fig. 1, evidenciando, además, características no lineales de funcionamiento.

Tanto la posición estática de la bola como su desplazamiento según una determinada trayectoria pueden conseguirse manipulando adecuadamente el movimiento de la plataforma. Es necesario imprimir a esta última diferentes ángulos de inclinación para conseguir reproducir la trayectoria deseada manteniendo el equilibrio de todo el sistema.

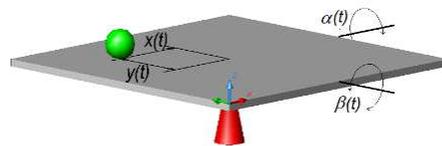


Fig. 1. Dispositivo físico de bola y plataforma

Para controlar el funcionamiento de este sistema, inherentemente inestable por su naturaleza, se han desarrollado diferentes métodos como la incorporación de compensadores de adelanto de fase, diseño de reguladores cuadráticos lineales (LQR) [1] o gaussianos (LQG), diseño de observadores de estado con control realimentado, controladores PD o PID convencionales [2][3], técnicas de control difuso [4], controladores adaptivos [5] y control por modos deslizantes [6], entre otras.

En este trabajo se desarrolló la estrategia conocida como “loop in the loop” [7], Fig. 2, consistente en un lazo interno funcionando como controlador de la inclinación transmitida a la plataforma, mientras que en el lazo externo se realimenta y controla finalmente la posición real de la bola sobre la placa.

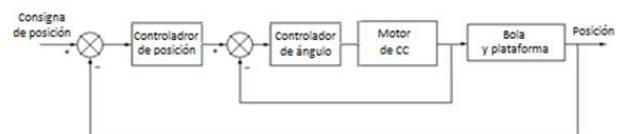


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema de control

Para lograr este objetivo se implementó un controlador del tipo PD en el lazo interno en tanto que para el exterior se ensayaron dos tipos de controladores diferentes. En primer término, un controlador basado en reglas difusas utilizando el modelo propuesto por Mamdani y en segundo lugar la estructura del tipo ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) la cual consiste en un sistema de inferencia construido con reglas difusas que incorpora las capacidades de aprendizaje de las redes neuronales [8].

Las simulaciones efectuadas permitieron comparar el desempeño de ambas configuraciones y obtener conclusiones con vistas a una implementación real del sistema.

II. MODELADO MATEMÁTICO

a. Dispositivo de Bola y Plataforma

Teniendo en cuenta las especificaciones de un equipo de características comerciales y utilización didáctica fueron deducidas las ecuaciones de movimiento aplicando la formulación general de Euler-Lagrange [9], y asumiendo las siguientes simplificaciones

- No hay deslizamiento de la bola sobre la plataforma
- La bola es completamente simétrica y homogénea
- Se desprecian las fricciones
- La bola se mantiene siempre apoyada en la plataforma

Para representar el desplazamiento de la bola se definieron las coordenadas x_b , y_b ubicando su origen en el centro del plano y, por otro lado, la inclinación de la plataforma fue considerada mediante los ángulos α y β respecto a los ejes x e y respectivamente, quedando en evidencia que el dispositivo contiene cuatro grados de libertad.

Por medio de consideraciones energéticas tanto cinéticas como potenciales se formularon en [9][10][11] las siguientes ecuaciones diferenciales no lineales, cuyos parámetros se describen en la TABLA I

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{x}_b - m_b(x_b\dot{\alpha}^2 + y_b\dot{\alpha}\dot{\beta})m_b g \text{ sen}\alpha \quad (1)$$

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{y}_b - m_b(y_b\dot{\beta}^2 + x_b\dot{\alpha}\dot{\beta})m_b g \text{ sen}\beta \quad (2)$$

$$\tau_{px} = (J_p + J_b + m_b x_b^2)\ddot{\alpha} + 2m_b x_b \dot{x}_b \dot{\alpha} + m_b x_b y_b \dot{\beta} + m_b \dot{x}_b y_b \dot{\beta} + m_b g x_b \text{ cos}\alpha \quad (3)$$

$$\tau_{py} = (J_p + J_b + m_b y_b^2)\ddot{\beta} + 2m_b y_b \dot{y}_b \dot{\beta} + m_b y_b x_b \dot{\alpha} + m_b \dot{y}_b x_b \dot{\alpha} + m_b g y_b \text{ cos}\beta \quad (4)$$

Las ecuaciones (1) y (2) describen el movimiento de la bola sobre la plataforma, indicando que la aceleración de la bola depende del ángulo y la velocidad angular de inclinación de la plataforma, en tanto que las ecuaciones (3) y (4) muestran como la inclinación de ésta es, asimismo, dinámicamente influenciada por la posición y velocidad de la bola. Este juego de ecuaciones diferenciales pone de manifiesto el comportamiento no lineal del sistema.

No obstante, la simetría que demuestran estas ecuaciones se observa la existencia de un acoplamiento interno en el sistema ya que los términos $\dot{\alpha}y_b\dot{\beta}$ y $x_b\dot{\alpha}\dot{\beta}$ indican que la aceleración aplicada en el ángulo de inclinación de la plataforma, según uno de los ejes de movimiento, modifica no solamente la posición de la bola sino también el ángulo de inclinación de la plataforma con respecto al otro eje de movimiento.

TABLA I PARÁMETROS DEL SISTEMA

Símbolo	Descripción
m_b	Masa de la bola
r_b	Radio de la bola
J_b	Momento de inercia de la bola
J_p	Momento de inercia de la plataforma
x_b	Posición de la bola en el eje x
y_b	Posición de la bola en el eje y
\dot{x}_b	Velocidad de la bola en el eje x
\dot{y}_b	Velocidad de la bola en el eje y
τ_{px}	Torque resultante sobre la plataforma en el eje x
τ_{py}	Torque resultante sobre la plataforma en el eje y
α	Ángulo aplicado a la plataforma según eje x
β	Ángulo aplicado a la plataforma según eje y
$\dot{\alpha}$	Velocidad angular de la plataforma según eje x
$\dot{\beta}$	Velocidad angular de la plataforma según eje y
$\ddot{\alpha}$	Aceleración angular de la plataforma según eje x
$\ddot{\beta}$	Aceleración angular de la plataforma según eje y
g	Aceleración de la gravedad

Sin embargo, asegurando una baja velocidad y aceleración de la plataforma resulta que $|\dot{\alpha}| \ll 1$ y $|\dot{\beta}| \ll 1$, con lo cual es posible considerar despreciable el efecto de los términos de acoplamiento y por lo tanto dividir el sistema en dos subsistemas de igual estructura y que pueden controlarse de manera independiente.

Las expresiones (5) y (6) representan las ecuaciones de estado para los subsistemas desacoplados.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ B(x_1 x_4^2 - g \text{ sen} x_3) \\ x_4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u_x] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_6 \\ B(x_5 x_8^2 - g \text{ sen} x_7) \\ x_8 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u_y] \quad (6)$$

siendo

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T = [x_b, \dot{x}_b, \alpha, \dot{\alpha}, y_b, \dot{y}_b, \beta, \dot{\beta}]^T$$

$$U = [u_x, u_y]^T = [\alpha, \beta]^T$$

$$Y = [x_1, x_5]^T = [x_b, y_b]^T$$

$$B = \frac{m_b}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)}$$

En la Fig. 3 se observa el modelo de simulación utilizado para la representación de la (5). Idéntico modelo se empleó para la (6), correspondiendo a los ejes x e y respectivamente.

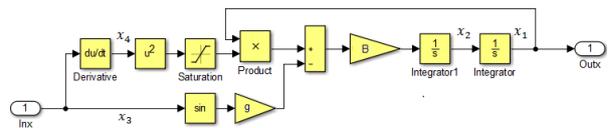


Fig. 3. Diagrama de simulación para un eje

b. Accionamientos de ejes

Para controlar la inclinación de la plataforma se aplicaron, sobre ésta, sendos pares motores τ_{px} y τ_{py} para producir los ángulos α y β en sus respectivas direcciones, Fig. 1.

En este trabajo se ha considerado que dichos pares son aplicados a mediante motores de corriente continua controlados desde la armadura y con excitación independiente y constante, Fig. 4.

En base a los principios físicos y parámetros eléctricos que determinan el funcionamiento de un motor de estas características a partir de una señal de tensión aplicada en su circuito de inducido, se deriva un modelo matemático que representa su dinámica de actuación [12][13].

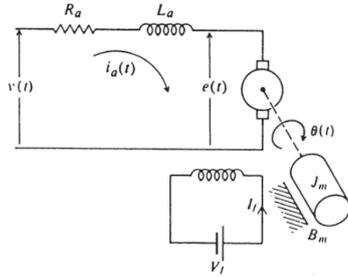


Fig. 4. Esquema de un motor de CC controlado por armadura

Aplicando la ley de tensiones de Kirchoff y la 2da. ley de Newton se tiene

$$v(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (7)$$

$$\tau(t) = J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (8)$$

y su representación en el espacio de estados a continuación

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & \frac{K_m}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [v] \quad (9)$$

$$\theta = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

III. DISEÑO DE CONTROLADORES

Conforme a la estrategia de control propuesta en la Fig. 2, para controlar adecuadamente la posición de la bola, la respuesta del lazo interno debe ser suficientemente más rápida que la respuesta del lazo exterior. Con este concepto se diseñó un controlador PD (proporcional derivativo) que asegura una rápida respuesta del motor que acciona la plataforma. Para el control del lazo externo se evaluaron las dos técnicas que son motivo del presente artículo.

a. Controlador Difuso (Mamdani)

A partir de la estructura de Mamdani se diseñó y ajustó un controlador en el que los valores difusos de las señales de

entrada, el error y su variación, se obtuvieron aplicando tres funciones de membresía del tipo triangular para cada una de ellas. Para la señal de salida se consideraron tres funciones del tipo trapezoidal, Fig. 5. Asimismo, para optimizar la respuesta fueron calibrados los niveles de las señales de entrada y salida aplicando los ajustes de ganancia respectivos [14].

En general, el ajuste de las funciones de pertenencia supone la existencia de un experto que provee la información necesaria para determinar los valores del sistema. Para el caso de los controladores difusos puede no existir una base sólida de conocimientos para un caso específico, o una configuración que permita obtener la mejor respuesta. Por ello los parámetros de diseño se ajustan normalmente en base al conocimiento de la dinámica del sistema y, si bien existen numerosos algoritmos con el objetivo de optimizar la sintonía, en la práctica es habitual utilizar el método directo de prueba y error. Este ha sido el procedimiento empleado en el trabajo, con el objetivo de que sea posible reproducir las trayectorias de referencia procurando mantener la estabilidad y un error aceptable. En la Fig. 6 se observa la superficie de control generada por el controlador.

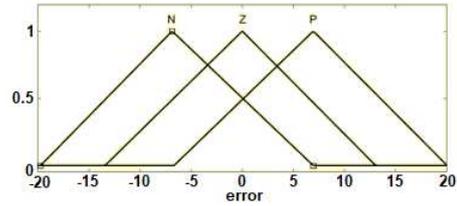


Fig. 5a. Funciones de membresía para el error

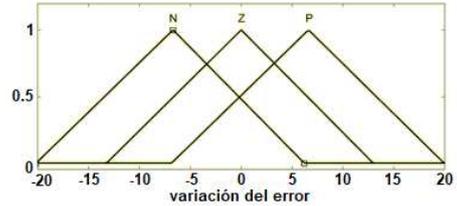


Fig. 5b. Funciones de membresía para cambios del error

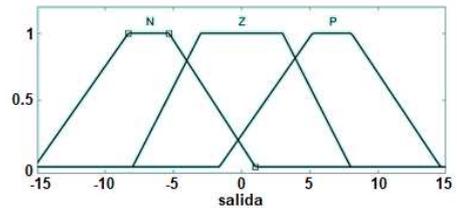


Fig. 5c. Funciones de membresía para la salida

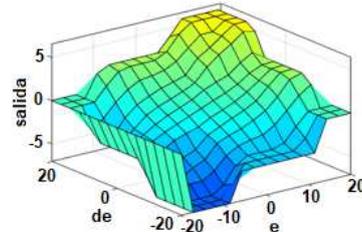


Fig. 6. Superficie de control generada por el controlador

b. Controlador Neuro-Difuso (ANFIS)

Los controladores neuro-difusos combinan la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales artificiales con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusos. Estas estructuras combinadas pueden ajustar la base de reglas de un sistema difuso, utilizando el algoritmo de entrenamiento de retro-propagación a partir de la recopilación de datos de un proceso. Su arquitectura es funcionalmente equivalente a una base de reglas del tipo Sugeno.

La primera fase del procedimiento consistió en obtener una serie de datos proporcionados por el sistema, a partir de la utilización de un controlador PID (proporcional-integral-derivativo) clásico en el lazo exterior del sistema, el cual fue sintonizado para obtener una respuesta adecuada de todo el conjunto. Como señales de entrada se consideraron el error de posición de la bola, su integral y su derivada.

Los datos de entrada y salida se importaron a la interfaz gráfica *Neuro-Fuzzy Designer* de Matlab® [15] para diseñar la red neuronal, y en este caso se utilizaron tres funciones de membresía del tipo "gbell" para cada una de las señales de entrada y una función del tipo "linear" para la salida. En la Fig. 7 se observa la red neuronal creada.

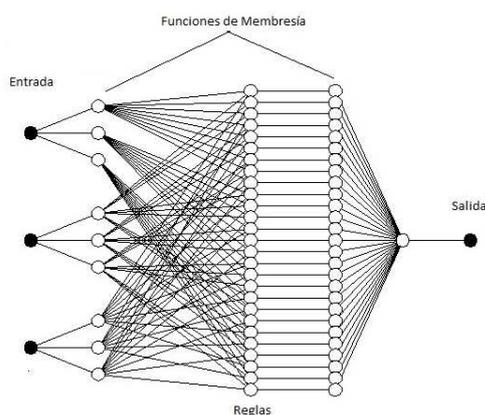


Fig. 7. Estructura de la red neuronal creada

Para su entrenamiento se empleó el método híbrido de optimización alcanzándose un error de 0.1 %, Fig. 8. Con la red entrenada se ajustó el universo de discurso de las señales de entrada a los intervalos [-1 1] para el error y la integral del error y al intervalo [-2 2] para la derivada del error.

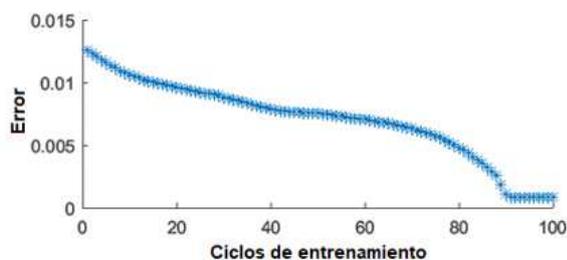


Fig. 8. Evolución del error de entrenamiento

IV. EVALUACIONES DE DESEMPEÑO

Conforme a lo expresado en (5) y (6) este sistema puede ser controlado por accionamientos independientes, los cuales aplican torques en direcciones perpendiculares sobre la plataforma. Con el propósito de verificar el desempeño de los dos tipos de controladores se efectuaron simulaciones utilizando Simulink®, a partir de la excitación del sistema con señales de consigna circular y cuadrada para generar las trayectorias del movimiento de la bola. Los valores específicos de los parámetros utilizados se obtuvieron de [9] para el dispositivo de bola y plataforma, y de [16] para los motores de CC.

a. Trayectoria circular

1) Controladores difusos Mamdani

En primer término se obtuvieron las respuestas del sistema a partir de la utilización de los controladores difusos de estructura Mamdani.

En la Fig. 9 se observan los resultados para una consigna de trayectoria circular generada mediante la aplicación de señales senoidales defasadas en 90 grados. Los niveles máximos de amplitud aplicados fueron de 25 % y 65 % respectivamente. Se incluyó la presencia de ruido con nivel 10^{-2} para la señal del sensor de ángulo de inclinación y 10^{-4} para la realimentación de la posición de la bola.

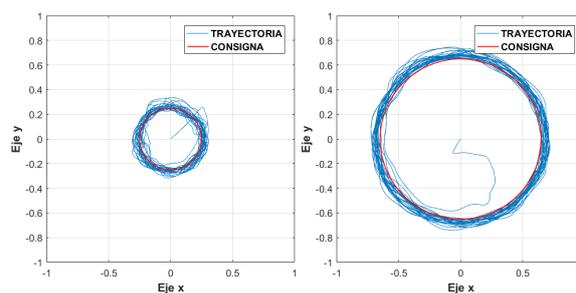


Fig. 9. Respuesta con controladores Mamdani, diferentes niveles de señal y presencia de ruido en los sensores

Se observa que en ambos casos las respuestas obtenidas son estables, sin embargo se evidencia una fuerte sensibilidad al efecto de los ruidos, manifestándose mayormente para bajas amplitudes de las señales de entrada.

2) Controladores neuro-difusos (ANFIS)

La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos con iguales amplitudes en las señales de entrada y niveles de ruido utilizados anteriormente.

Para los controladores neuro-difusos se puede apreciar un mayor tiempo inicial para alcanzar la posición de consigna, no obstante, las respuestas son más precisas y con menor impacto de los ruidos en los lazos de realimentación, aún con una menor relación señal-ruido.

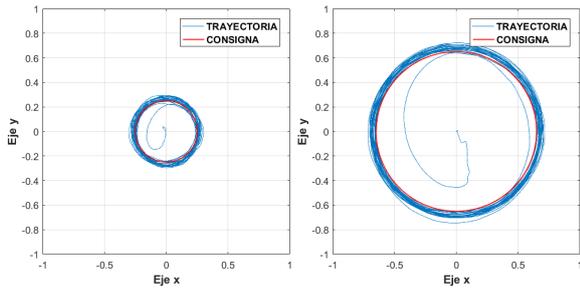


Fig. 10. Respuesta con controladores ANFIS, diferentes niveles de señal y presencia de ruido en los sensores

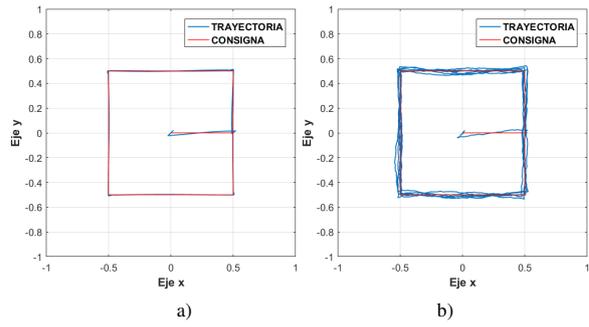


Fig. 12. Respuesta con controladores neuro-difusos a) sin ruido, b) con ruido

b. Trayectoria rectangular

1) Controladores difusos Mamdani

En una segunda instancia se realizaron simulaciones mediante la aplicación de una trayectoria de referencia rectangular, imponiendo una mayor exigencia para los controladores en función de los cambios bruscos de dirección. El sistema fue excitado con una amplitud de entrada de 50 % en todos los casos.

En la Fig. 11 se aprecian las trayectorias recorridas por la bola para el sistema sin afectación de ruidos, y con niveles de ruido de 10^{-2} y 10^{-4} para las realimentaciones de ángulo y posición respectivamente.

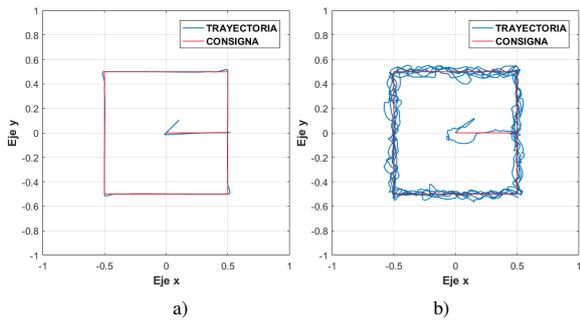


Fig. 11. Respuesta con controladores difusos Mamdani a) sin ruido, b) con ruido

Las respuestas obtenidas también fueron estables y se destaca el significativo impacto que produce la presencia de ruido, siendo en mayor medida el que afecta al lazo externo, que realimenta la posición de la bola.

2) Controladores neuro-difusos (ANFIS)

Se presentan en la Fig. 12 las respuestas del sistema a partir de la utilización de controladores neuro-difusos, con iguales condiciones de simulación que en los casos anteriores.

En los resultados obtenidos se evidencia una mayor capacidad del sistema para reproducir la consigna establecida, con una notable disminución de la dispersión causada por efecto de los ruidos.

c. Efecto de perturbaciones

Finalmente se presenta en la Fig. 13 una comparación del desempeño de ambos tipos de controladores frente a la ocurrencia de una perturbación externa sobre la plataforma, impactando en ambos ejes del movimiento luego de transcurrido el 30 % del tiempo total de la simulación.

A los efectos de someter el sistema a una condición exigente, se aplicó una perturbación con amplitud del 100 % respecto de los valores de las señales de entrada, verificándose la capacidad de estabilización de los dos tipos de controladores para restituir la trayectoria adecuada.

La acción de los controladores difusos convencionales permitió recuperar la consigna rápidamente, aunque con mayor amplitud del apartamiento. En el caso de los controladores neuro-difusos se verificó un tiempo de estabilización superior, pero logrando menor apartamiento respecto de la consigna.

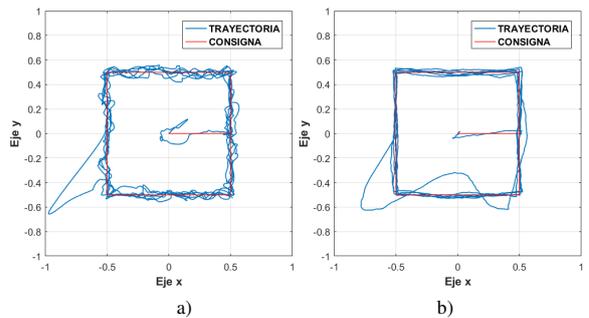


Fig. 13. Respuestas frente a una perturbación a) controlador difuso, b) controlador neuro-difuso

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un análisis comparativo respecto del desempeño operativo de dos modelos diferentes de controladores diseñados en base a técnicas difusas, y aplicados al caso de una planta inestable como es el mecanismo de bola y plataforma.

A diferencia del análisis realizado en un trabajo previo [17], se tomaron en consideración características físicas que determinan un modelo no lineal del dispositivo, tornando más exigentes las condiciones para el control adecuado de funcionamiento.

Ambos modelos fueron evaluados en simulación con iguales condiciones de muestreo, tanto para el lazo interno como el externo de cada eje, se analizó el comportamiento en primer término de un controlador clásico de estructura Mamdani y posteriormente un controlador del tipo neuro-difuso frente a dos trayectorias de referencia propuestas. Asimismo, se realizaron pruebas en el contexto de existencia de ruido proporcionado por los sensores y perturbación externa.

Los resultados obtenidos demuestran que los sistemas de control basados en técnicas difusas resultan eficientes para plantas o procesos inestables y no lineales, siendo particularmente ventajosos en el caso de que éstos no puedan modelarse con precisión o cuyos parámetros no sea posible medir o determinar con suficiente exactitud. La capacidad de adaptación que proporcionan las redes neuronales permitió que los modelos neuro-difusos produzcan respuestas más precisas y con mayor insensibilidad ante la influencia de ruidos.

REFERENCIAS

- [1] M. Keshmiri, A. Jahromi, A. Mohebbi, M. Amoozgar y Wen-Fang Xie. "Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches". *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 5, no. 1. March 2012.
- [2] S. Colmenares, M. Moreno Amendáriz, C. Perez Olvera, Wen Yu, F. Ortiz Rodríguez, "Modeling and nonlinear PD regulation for ball and plate system", *World Automation Congress*, 2012.
- [3] P. Mani Maalini, G. Prabhakar, S. Selvaperumal, "Modelling and control of ball and beam system using PID controller", *International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies*, ICACCCT, 2016.
- [4] N. Yubazaki, J. Yi, M. Otani, N. Unemura, K. Hirota, "Trajectory tracking control of unconstrained objects based on the SIRMs dynamically connected fuzzy inference model", *Proceeding of 6th International Fuzzy Systems Conference*, vol. 2, pp. 609-614, 1997.
- [5] Y. Pattanapong, C. Deelerpaiboon, "Ball and plate position control based on fuzzy logic with adaptive integral control action", *International Conference on Mechatronic and Automation*, *Proceeding of IEEE*, Japan, August 2013.
- [6] H. Liu, Y. Liang, "Trajectory tracking sliding mode control of ball and plate system", *2nd International Asia Conference on Informatic in Control, Automation and Robotics*. 2010.
- [7] H. Wang, Y. Tian, Z. Sui, X. Zhang, C. Ding, "Tracking control of ball and plate system with a double feedback loop structure", *Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, August 2007.
- [8] Jang, J.-S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 23, N° 3, pp. 665-685.
- [9] HUMUSOFT Ltd., CE151 Ball & Plate Apparatus, User's Manual, rev. 3.2, 1996-2008.
- [10] X. Fan, N. Zhang, and S. Teng, "Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 144, pp. 297-312, 2003.
- [11] D. Yuan, Z. Zhang, "Modelling and control scheme of the ball-plate trajectory-tracking pneumatic system with a touch screen and a rotary cylinder", *Control Theory & Applications*, IET, vol. 4, no. 4, pp. 573-589, 2010.
- [12] R. C. Dorf, R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 12a ed., Prentice Hall, 2011, pp 70-73.
- [13] S. M. Shinnars, *Modern Control Systems Theory and Design*, 2nd. Ed., New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [14] K. Passino, S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison-Wesley Longman, Inc, 1998, pp. 78-83.
- [15] The MathWoks, Inc., *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide*, 3 Apple Hill Drive, Natick, Massachusetts, EE.UU., 2015.
- [16] B. Messner, D. Tilbury, *Control Tutorials for Matlab & Simulink*, University of Michigan and Carnegie Melon University, 2011. [Online]. Disponible en <http://ctms.engin.umich.edu/>
- [17] J. J. Penco, M. R. Modesti, "Control difuso versus PID para un sistema de bola y plataforma", *Actas de las IX Jornadas Argentinas de Robótica*, JAR2017, Córdoba, Argentina, pp. 163-168, Nov. 2017.