



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar
DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

Title: Convergencia de la trayectoria lingüística en el espacio de estados de un controlador difuso aplicado a un sistema no lineal.

Authors: TELLEZ-CUEVAS, Pedro, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y LUNA-CARRASCO, Claudia Yadira.

Editorial label ECORFAN: 607-8695
BCIERMMI Control Number: 2019-215
BCIERMMI Classification (2019): 241019-215

Pages: 25
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control no lineal presentan resultados más exactos sobre los lineales, particularmente porque son validos en todo rango de variación de las variables; sin embargo presentan mayor complejidad en su desarrollo y análisis.

Al aplicar técnicas convencionales de control clásico encuentran rápidamente sus limitaciones ya que no son capaces de adaptarse a los cambios y perturbaciones sufridas por los procesos debido a su naturaleza lineal.

En contraste con las técnicas de control clásico existen otro tipo de metodologías como la Lógica Difusa que se utiliza como una alternativa a los controladores clásicos y modernos con el fin de lograr un mejor desempeño

Los controladores difusos se describen por reglas *IF-THEN* y brindan una representación sencilla y comprensible del conocimiento.

Generalmente se pueden clasificar en dos tipos: Mamdani y Takagi-Sugeno. La principal diferencia radica en la consecuencia de las reglas. Para el controlador tipo Mamdani, esta consecuencia es un conjunto difuso y para el tipo Takagi-Sugeno es una función lineal de las entradas.

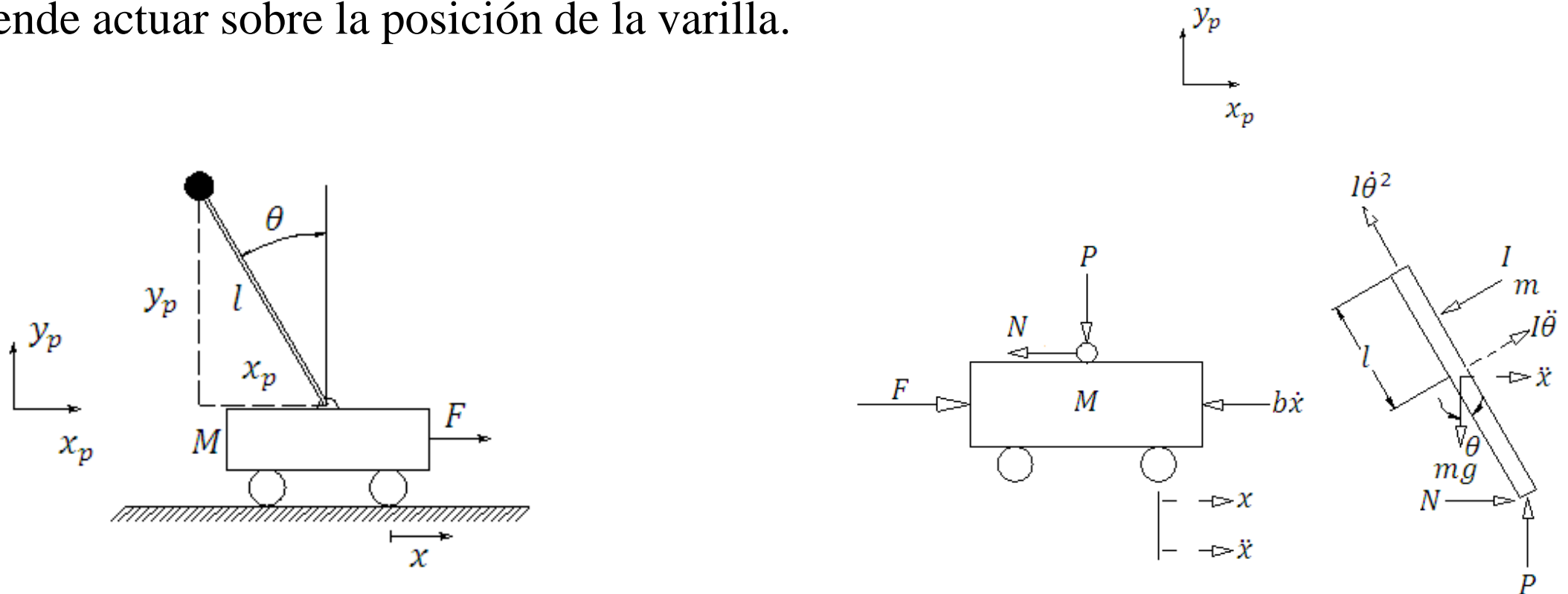
En el controlador del tipo Mamdani, aquí las reglas difusas *IF-THEN* son de la forma siguiente:

$$R^i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i \text{ THEN } y \text{ is } B^i$$

METODOLOGÍA

Los péndulos invertidos son una familia de artefactos que constituyen un banco de pruebas muy completo e interesante para el análisis de control no lineal.

En este trabajo el péndulo invertido está montado sobre un carro que se mueve en forma rectilínea bajo la acción de una fuerza que es la acción de control con la que se pretende actuar sobre la posición de la varilla.



Las ecuaciones que representan el modelo matemático del sistema péndulo invertido:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\dot{\theta}^2 \operatorname{sen}\theta - ml\ddot{\theta} \cos\theta = u$$
$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \operatorname{sen}\theta = -ml\ddot{x} \cos\theta$$

El análisis de un sistema no lineal se simplifica cuando se linealiza alrededor de algún punto de operación.

Las ecuaciones que representan el modelo matemático del sistema péndulo invertido:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\dot{\theta}^2 \operatorname{sen}\theta - ml\ddot{\theta} \cos\theta = u$$
$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \operatorname{sen}\theta = -ml\ddot{x} \cos\theta$$

El análisis de un sistema no lineal se simplifica cuando se linealiza alrededor de algún punto de operación.

Para obtener una versión lineal del modelo se considera el caso de pequeñas oscilaciones ($\pm 0.261799 \text{ rad} = \pm 15^\circ$), bajo esta consideración se tiene que:

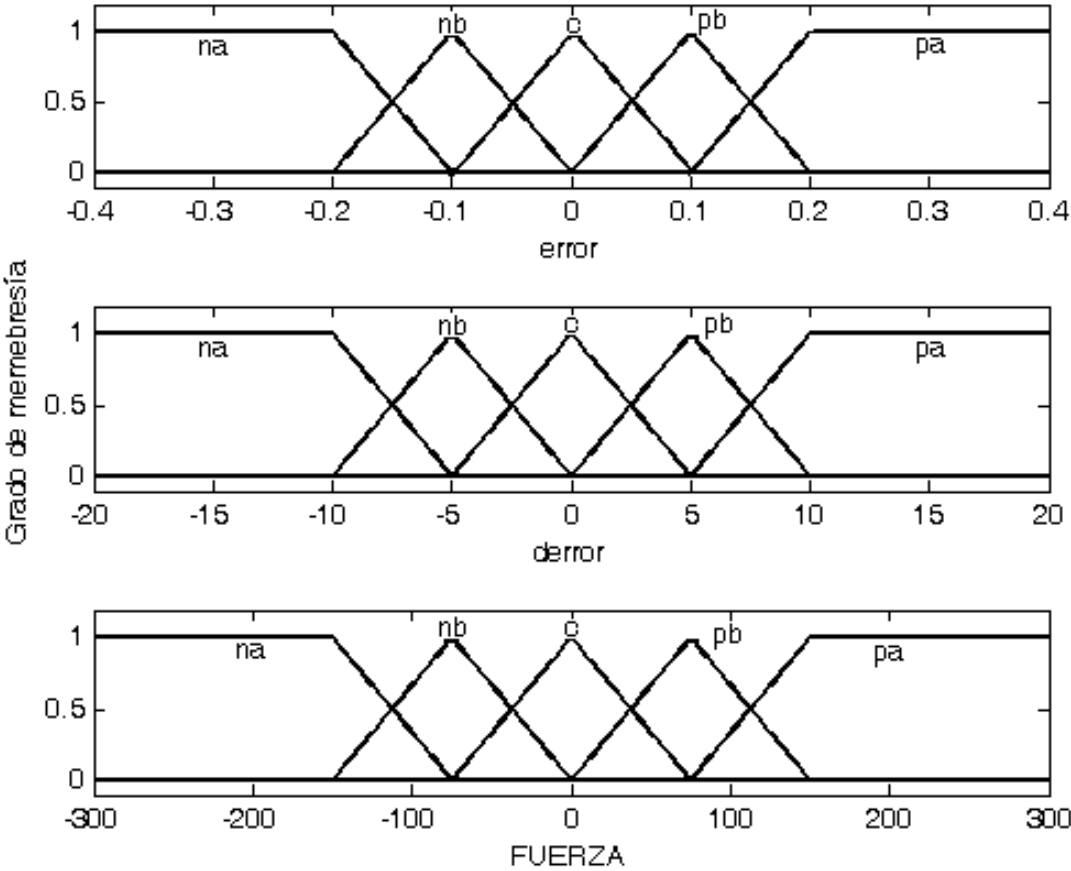
$$\text{sen}\theta \approx \theta \text{ y } \text{cos}\theta \approx 1$$

Las dos ecuaciones de movimiento se simplifican considerablemente y con lo cual se representa el modelo linealizado.

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\theta} = u$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\theta = ml\ddot{x}$$

Para el diseño de los controladores para el sistema péndulo invertido se considera que la posición angular tiene las siguientes las funciones de membresía y están definidas como:



Se presenta en forma matricial al conjunto de las reglas que definen el funcionamiento del controlador, tal y como lo muestra la Tabla

FUERZA		DERROR				
		NA	NB	C	PB	PA
ERROR	NA	NA R1	NA R2	NA R3	NB R4	C R5
	NB	NA R6	NA R7	NB R8	C R9	PB R10
	C	NA R11	NB R12	C R13	PB R14	PA R15
	PB	NB R16	C R17	PB R18	PA R19	PA R20
	PA	C R21	PB R22	PA R23	PA R24	PA R25

Con base a la matriz de reglas, se estructuran los enunciados de la base de reglas para el mecanismo de inferencia, obteniendo:

R1:IF *error* es **na** AND *derror* es **na** THEN *fuerza* es **na**

R2:IF *error* es **na** AND *derror* es **nb** THEN *fuerza* es **na**

R13:IF *error* es **c** AND *derror* es **c** THEN *fuerza* es **c**

R24:IF *error* es **pa** AND *derror* es **pb** THEN *fuerza* es **pa**

R25:IF *error* es **pa** AND *derror* es **pa** THEN *fuerza* es **pa**

El control PID en el caso del péndulo invertido se aplica al modelo linealizado, por lo que para sintonizar este controlador se requiere obtener la función de transferencia:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q_1} s^2 - \frac{(M + m)mgl}{q_1} s - \frac{bmgl}{q_1}}$$

donde:

$$q_1 = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2]$$

Para este trabajo se consideran los siguientes datos del sistema:

M	Masa del carro	0.5 Kg
m	Masa del péndulo	0.2 Kg
b	Fricción del carro	0.1 N/m/sec
g	Gravedad	9.8 m/s ²
I	Inercia del péndulo	0.006 Kg*m ²
L	Longitud del péndulo	0.3 m

La función de transferencia en lazo abierto con los datos antes mencionados es la siguiente:

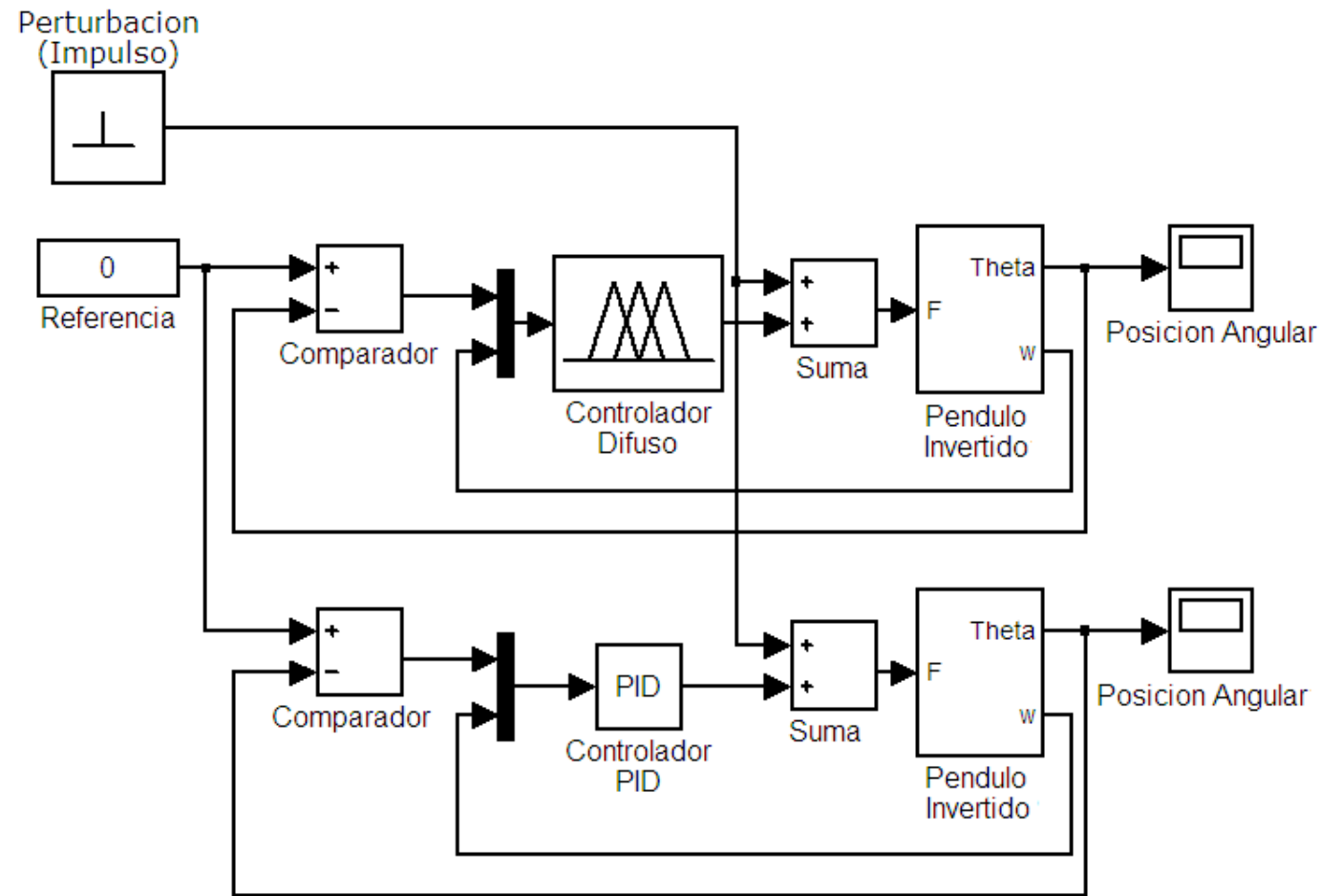
$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{4.545s}{s^3 + 0.1818s^2 - 26.64s - 4.455}$$

Para el cálculo de las ganancias del controlador se utiliza el método de Ziegler-Nichols y el lugar de las raíces, basado en la ganancia crítica y el periodo crítico. Los valores de las ganancias del controlador PID son:

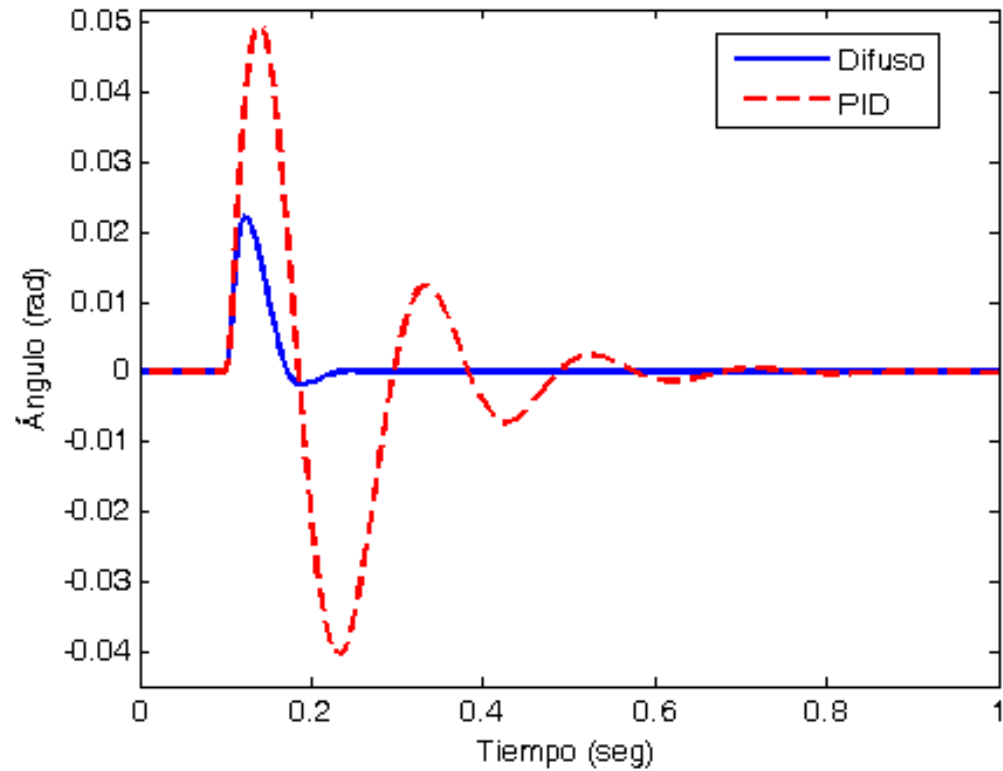
Ganancia proporcional Kp:	431.3853
Ganancia integral Ki:	4119.4
Ganancia derivativa Kd:	9.0349

RESULTADOS

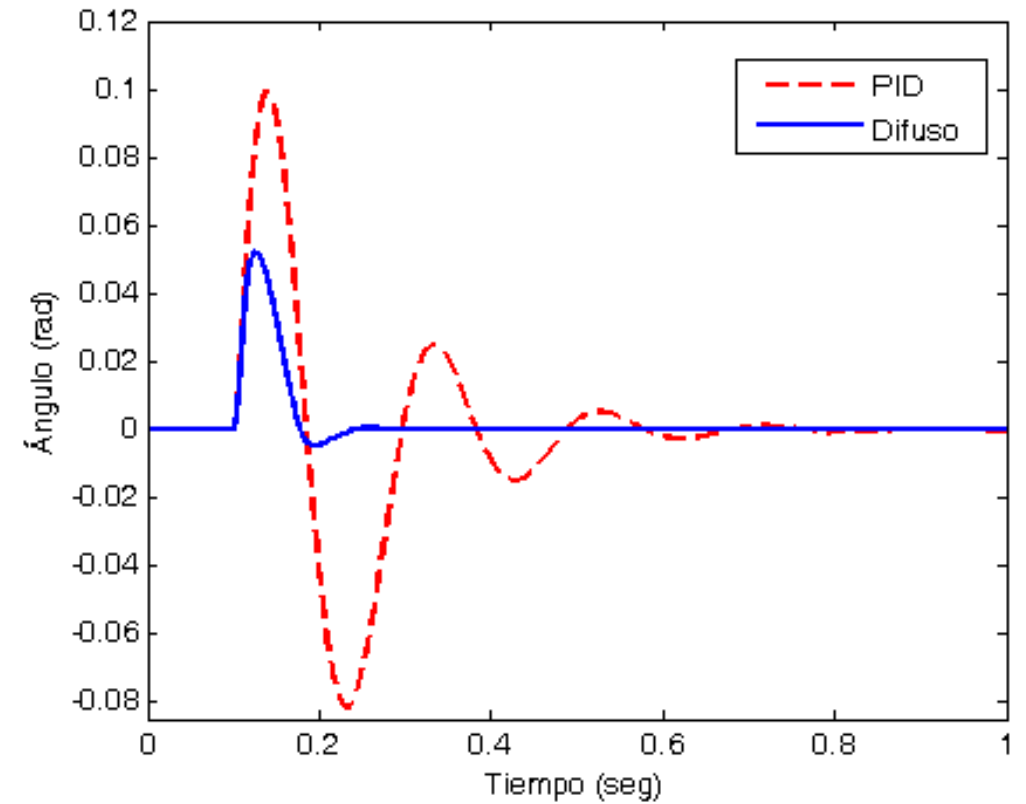
La simulación del sistema péndulo invertido con controlador se desarrolla sobre el software MATLAB/SIMULINK empleando la herramienta FUZZY LOGIC TOOLBOX, la cual permite realizar pruebas y simulaciones, además de ver resultados de forma gráfica. En la figura se muestra el sistema en SIMULINK con el controlador difuso y con el PID.



Para las pruebas se utiliza una señal impulso simulando una fuerza externa de 1N como perturbación.



La figura muestra el comportamiento con una fuerza de 2N como perturbación.



La estabilidad es una característica importante que se debe considerar en el desarrollo y análisis de un controlador, cuando el sistema es lineal se dispone de algunos criterios, como el criterio de estabilidad de Routh o el de Nyquist, desafortunadamente cuando el sistema es no lineal estos criterios no son aplicables.

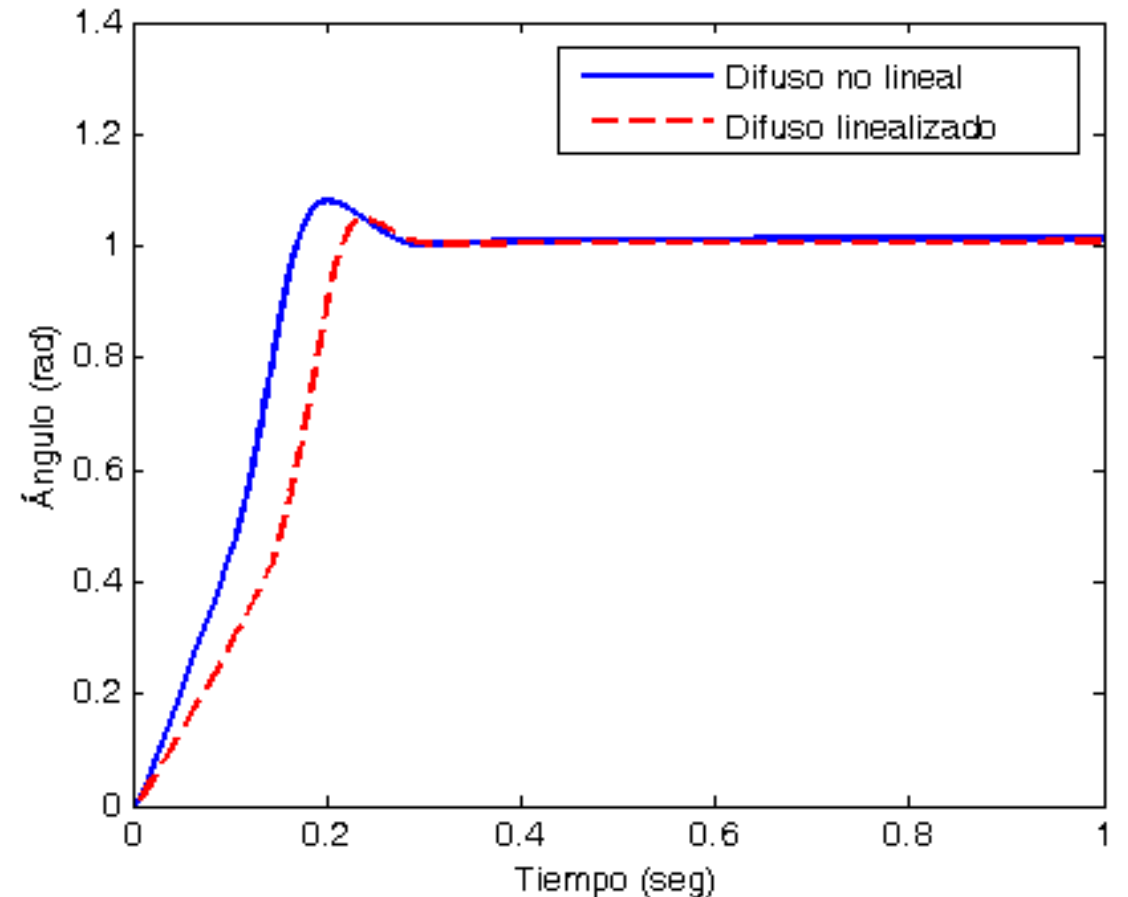
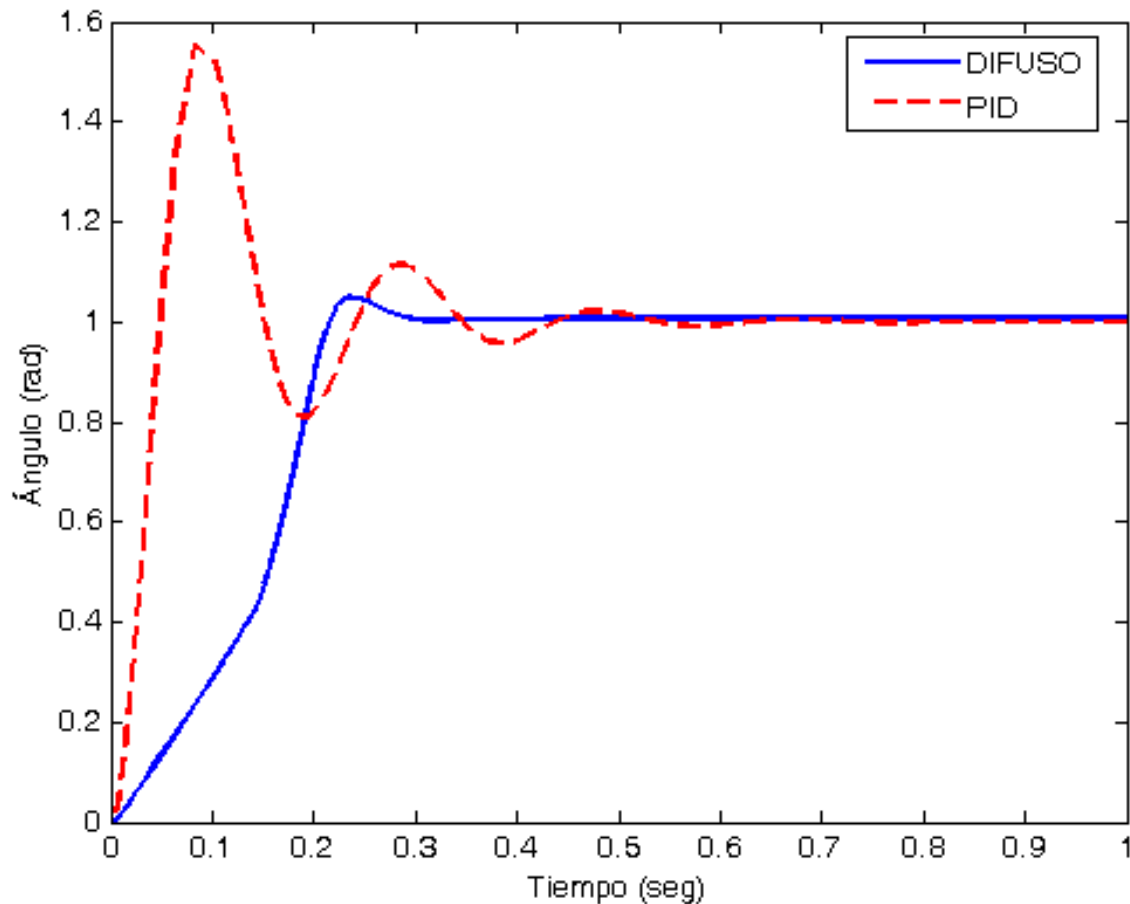
Para el análisis de estabilidad del controlador difuso por medio de la trayectoria lingüística se emplea el espacio de estados y se define como el conjunto obtenido por el disparo de las reglas en el sistema y trazando una trayectoria la cual corresponde a alguno de los posibles recorridos que podría seguir el controlador durante su desempeño.

ACCION		DERROR				
		NA	NB	C	PB	PA
ERROR	NA	ZONA 4			ZONA 1	
	NB				ZONA 0	
	C	ZONA 3				
	PB					
	PA					

La figura muestra la trayectoria lingüística donde se observa como converge en la regla 13 donde el error y la derivada del error es cero y por supuesto la salida es cero.

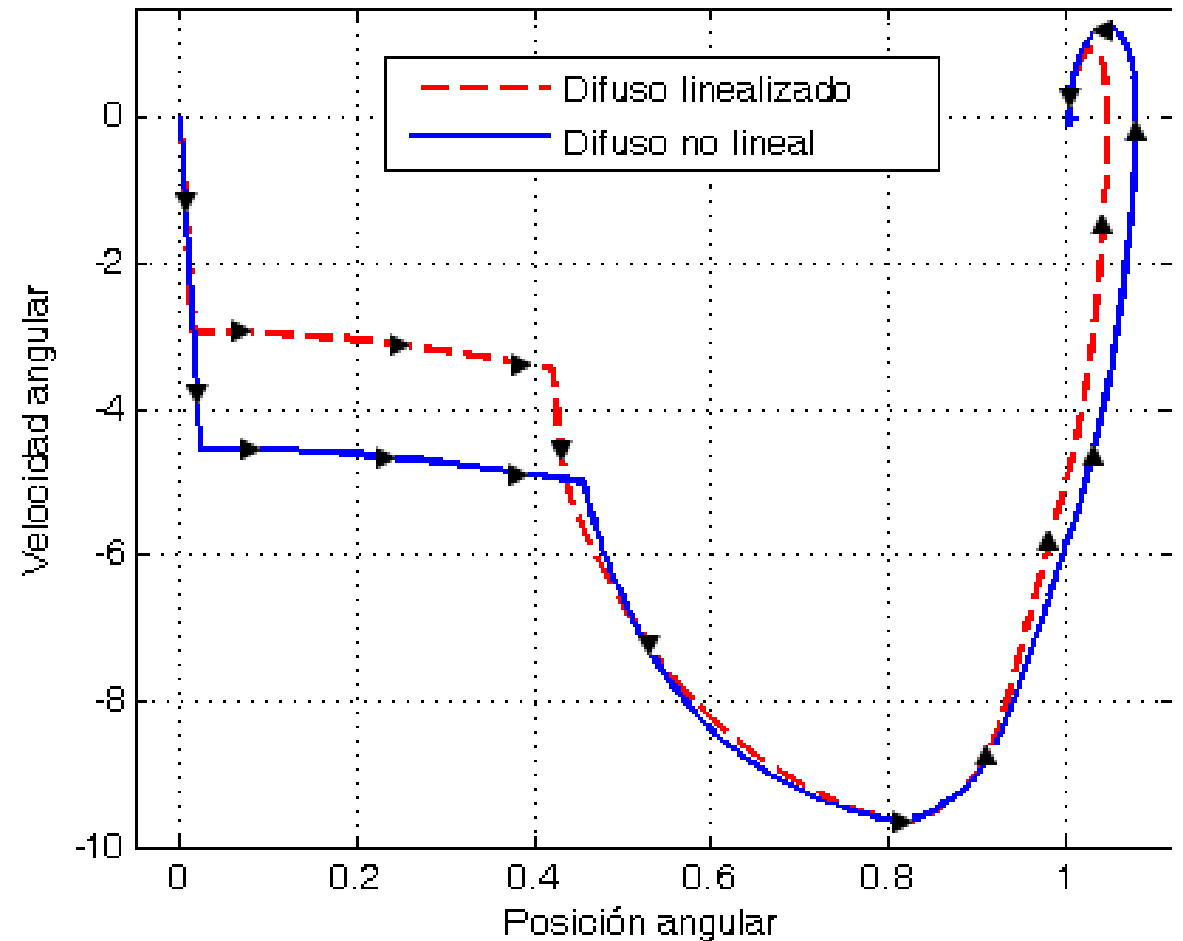
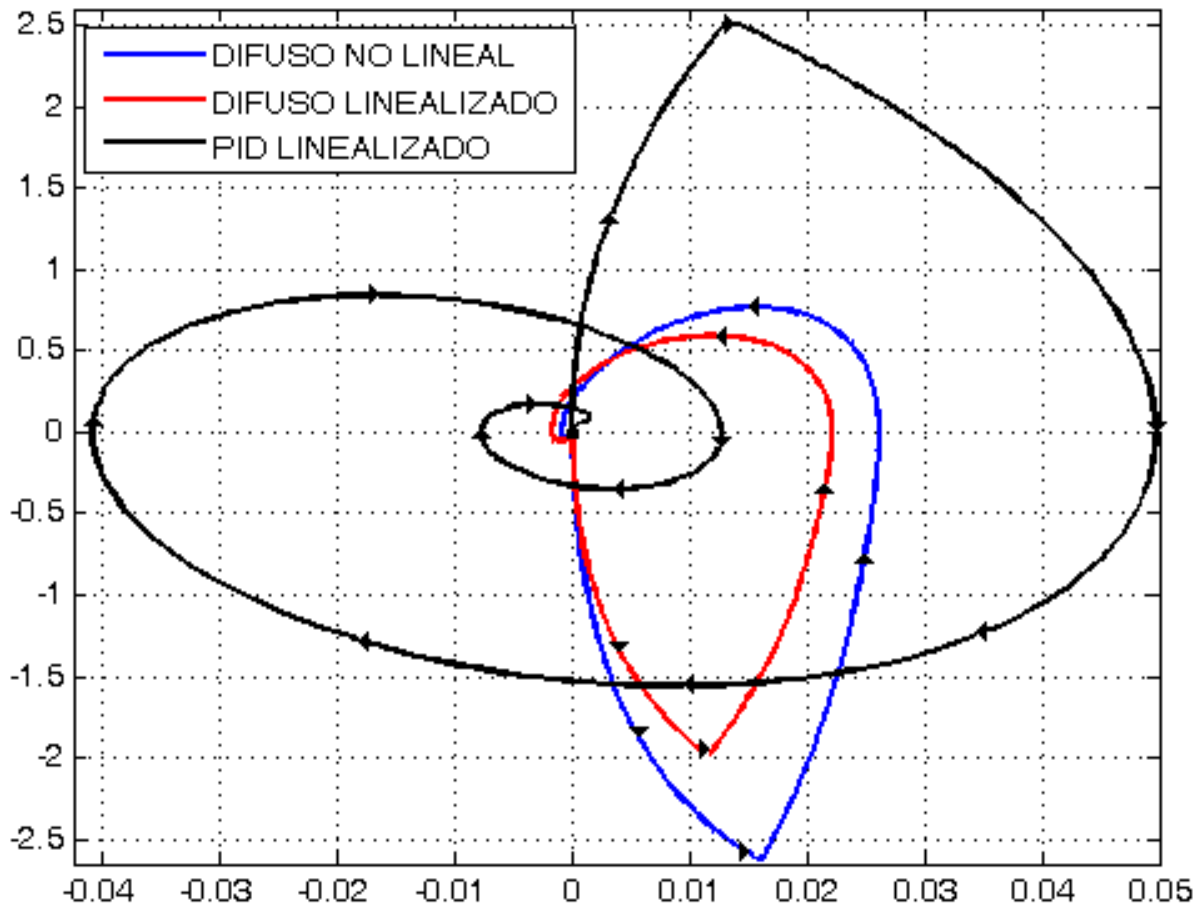
FUERZA		DERROR				
		NA	NB	C	PB	PA
ERROR	NA	NA R1	NA R2	NA R3	NB R4	C R5
	NB	NA R6	NA R7	NB R8	C R9	PB R10
	C	NA R11	NB R12	C R13	PB R14	PA R15
	PB	NB R16	C R17	PB R18	PA R19	PA R20
	PA	C R21	PB R22	PA R23	PA R24	PA R25

Para observar las características de desempeño de los sistemas de control sobre el modelo lineal, se obtiene la respuesta transitoria para la entrada escalón unitario. En la figura se muestran las respuestas transitorias con el controlador difuso y con el PID, aquí se observa que la respuesta con el controlador difuso presenta un tiempo de asentamiento y sobrepaso considerablemente menor que la del controlador PID, el cual llega a alcanzar un sobrepaso cercano al 60 %.

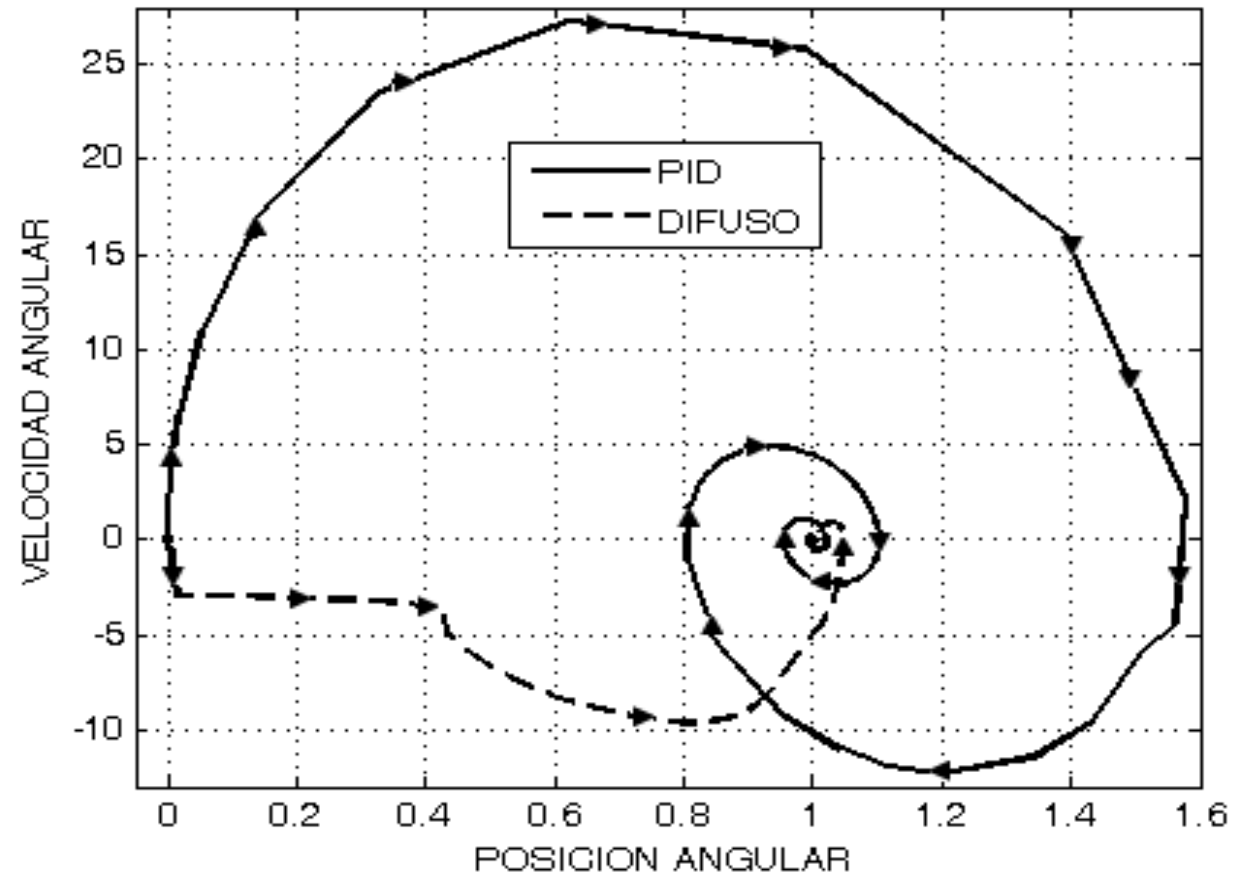


En la otra alternativa para verificar la estabilidad del sistema, por medio del análisis gráfico con el plano de fase, donde se grafica la posición angular contra su velocidad, para la respuesta del sistema con entrada escalón unitario.

La figura muestra los planos de fase del sistema lineal y el no lineal, ambos con el mismo controlador difuso.



En la figura se hace la comparación en el plano de fase de la trayectoria de las respuestas del sistema lineal con controlador difuso y con PID como referencia para un entrada escalón unitario.



ANEXOS

CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO USANDO MATLAB

Para la construcción del controlador se utilizo el FUZZY LOGIC TOOLBOX de Matlab que contiene herramientas gráficas para la construcción, edición y observación de un sistema de inferencia difuso:

- Sistema de inferencia difuso (FIS)
- Funciones de membresía (MF)
- Editor de reglas
- Visualizador de reglas
- Visualizador de superficies

FIS Editor: pendulo11

File Edit View

error

derror

pendulo11
(mamdani)

FUERZA

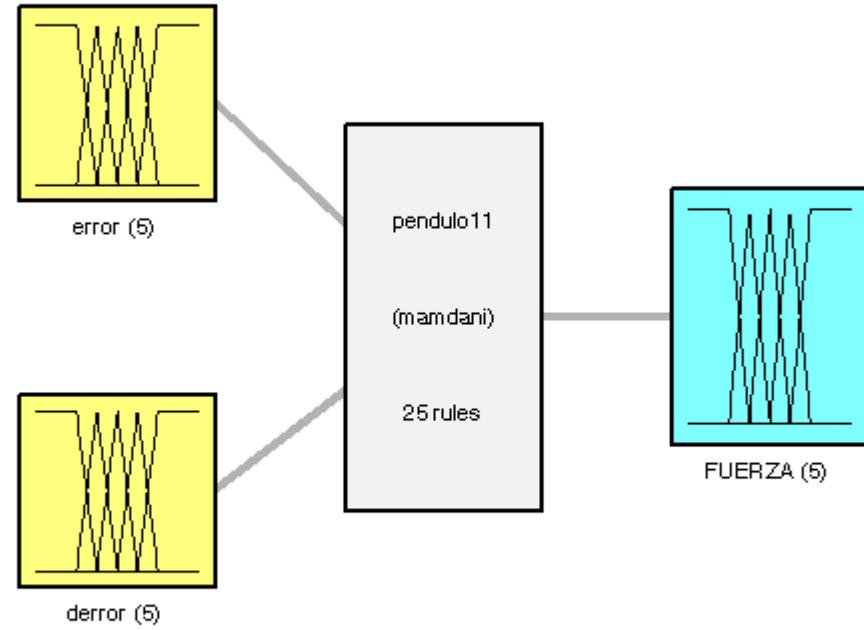
FIS Name: pendulo11 FIS Type: mamdani

And method: min
Or method: max
Implication: min
Aggregation: max
Defuzzification: centroid

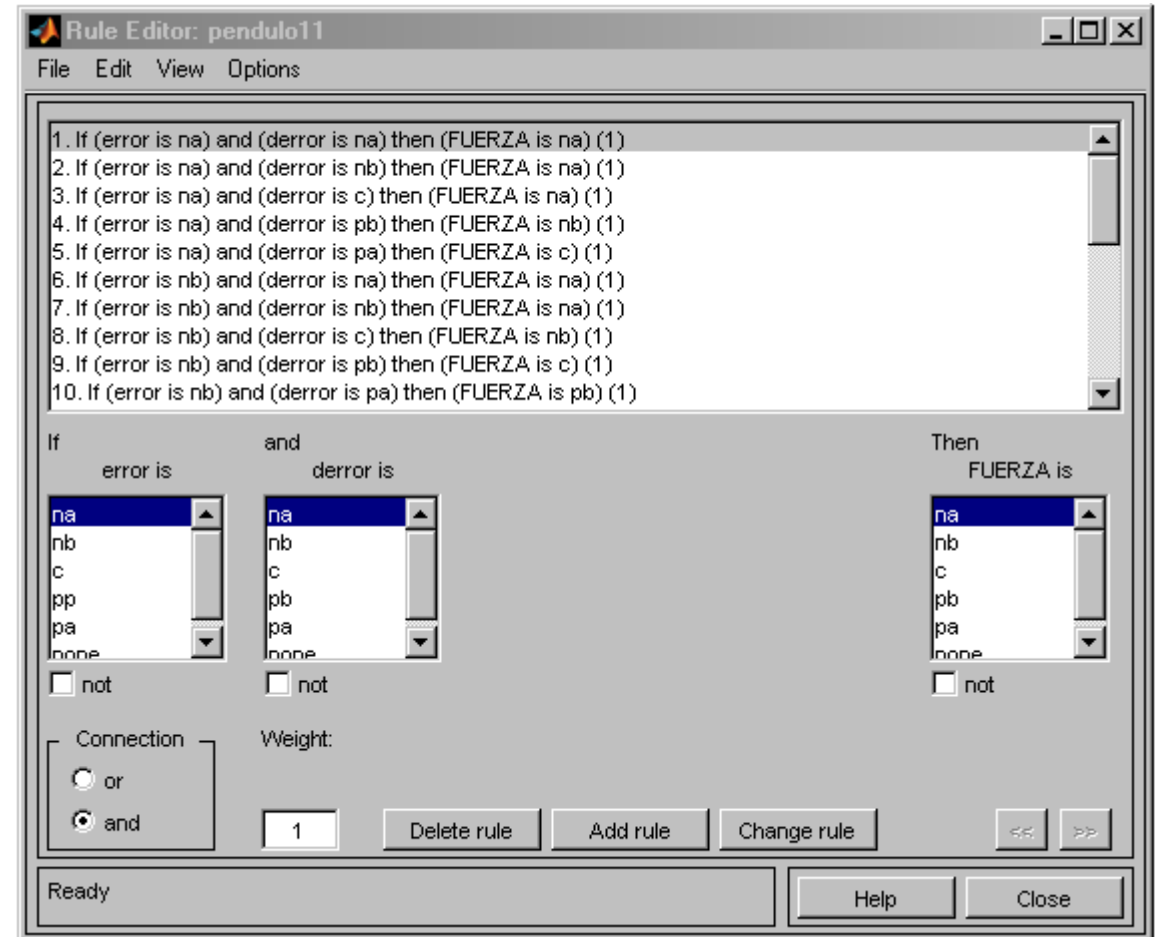
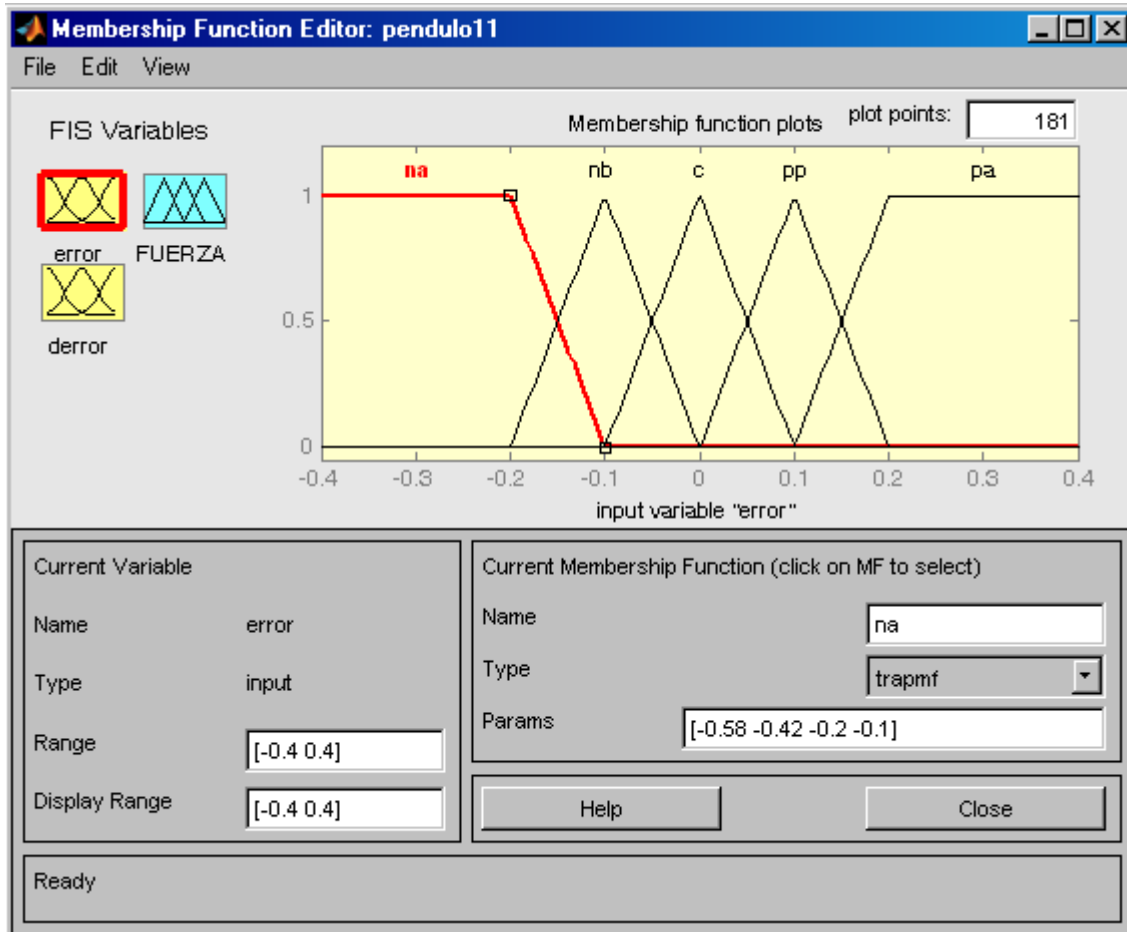
Current Variable:
Name: error
Type: input
Range: [-0.4 0.4]

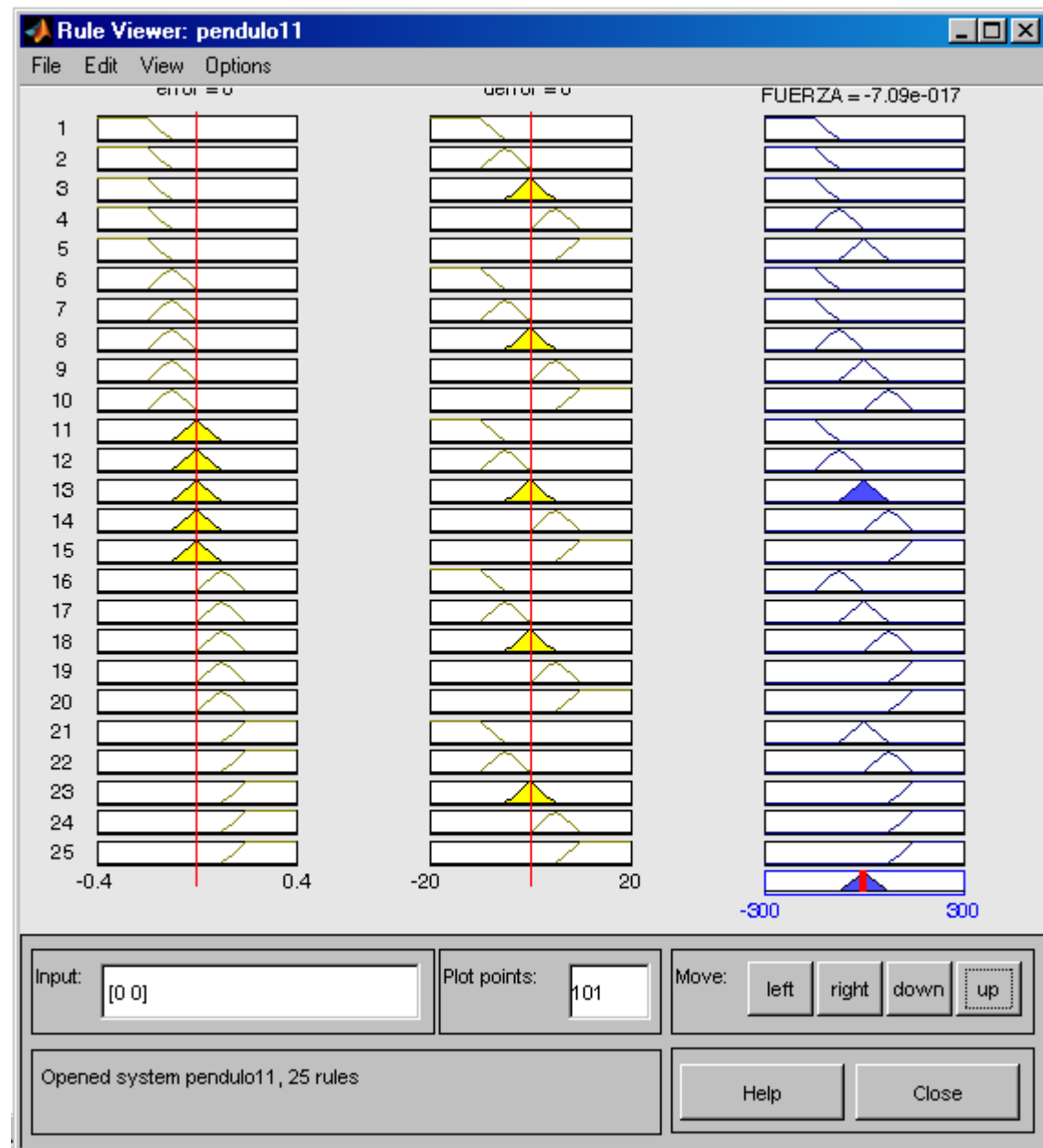
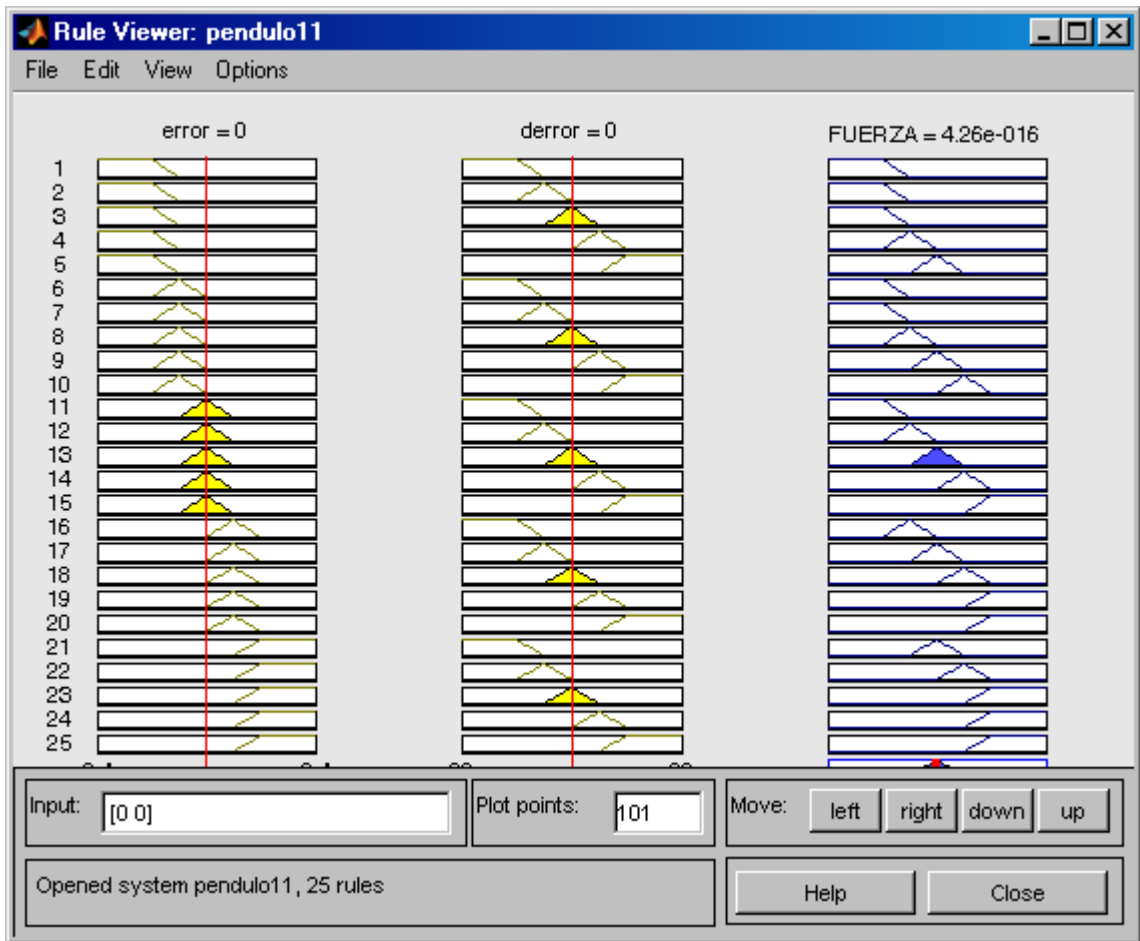
Help Close

Ready



System pendulo11: 2 inputs, 1 outputs, 25 rules





CONCLUSIONES

Se desarrolla un controlador difuso para un sistema péndulo invertido, el cual es representado por un modelo no lineal, del que se obtiene un modelo equivalente linealizado bajo la consideración de pequeñas oscilaciones.

Se obtiene el comportamiento dinámico del sistema con una perturbación como fuerza externa (función impulso), para dos casos y con referencia a la posición vertical.

Se comparó y se mostró el desempeño de los controladores difuso y PID, sobre el modelo lineal con entrada escalón unitario.

En el análisis de estabilidad, con la trayectoria lingüística del sistema péndulo invertido con un controlador difuso, observándose que la trayectoria converge rápidamente a cero indicando que se ha alcanzado el estado estable.

Para el método de estabilidad por medio de plano de fase, donde se hace la comparación entre las trayectorias de la respuesta del sistema lineal con controlador difuso y con el controlador PID donde ambas respuestas convergen al mismo valor de referencia.

REFERENCIAS

- [1] Dorf, Richard C.y Bishop Robert H., *Sistemas de Control Moderno*, 10. Ed., Prentice-Hall, 2007.
- [2] H. J. Marquez. *Nonlinear control systems. Analysis and design*. John Wiley & Sons,Inc., 2003.
- [3] S. Sastry. *Nonlinear system: analysis, stability, and control*. Springer, New York, 1999.
- [4] Kılıç, E., Özçalık, H.R.,Yılmaz, Ş, Şit, S,. “A Comparative Analysis of FLC and ANFIS Controller for Vector Controlled Induction Motor Drive.” *ACEMP - OPTIM - ELECTROMOTION JOINT CONFERENCE*. 2015.
- [5] Kılıç, E., Özçalık, H.R., Yılmaz, Ş, Gani A,. “Isıl İşlem Uygulamalarında Kullanılan Bir Karışım Tankının Bulanık Mantık Esaslı Denetimi.” *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences (KSU-JES)*, Cilt: 17 Sayı:1, 16-21. 2014
- [6] Özçalık, H.R., Kılıç, E., Yılmaz, Ş., Gani, A. “Bulanık Mantık Esaslı Sıvı Seviye Denetiminde Farklı Üyelik Fonksiyonlarının Denetim Performansına Etkisinin İncelenmesi.” *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, pp.243-247. 2013

- [7] Özçalık, H. R., Yıldız, C., Danacı, M., Koca, Z. “RBF Based Induction Motor Control with a Good Nonlinearity Compensation.” Computational and Ambient Intelligence Volume 4507 of the series Lecture Notes in Computer Science pp 878-886. 2007.
- [8] R. Brasilia, V.Sankaranarayanan, Nonlinear control of mobile inverted pendulum, Robotics and Autonomous Systems, 70 (2015), 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.02.012>
- [9] M. M. Almeida, G. V. Raffo, Nonlinear Balance Control of an Inverted Pendulum on a Tilt-rotor UAV, IFAC-PapersOnLine, 48 (2015), no. 19, 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.078>
- [10] K. M. Passino and S. Yurkovich. Fuzzy Control. AddisonWesley Longman, Inc., Menlo Park, California, USA, 1998.
- [11] L. X. Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [12] Mohan Akole, Barjeev Tyagi (2008) “Design of fuzzy logic controller for nonlinear model of inverted pendulum-cart system”, XXXII National Systems Conference, Nsc, pp 750-755.
- [13] K.Ogata, Ingeniería de Control Moderno, 3a.Ed. Prentice-Hall, 1998.

- [14] Leonid Reznik, “Fuzzy Controllers”, Newnes, Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1er Ed., ISBN 0 7506 3429 4., 1997.
- [15] Lee C. C. (1990), “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller (Part I and II)”. IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 2, pp. 404-435.
- [16] Braae, M. and D. A. Rutherford (1979), “Theoretical and linguistics aspects of the fuzzy logic controller”, Automatica, vol. 15, pp. 553-577.
- [17] Basil M. Al-Hadithi, Fernando Matía y Agustín Jiménez.(2007). “Análisis de estabilidad de sistemas borrosos”. Revista Iberoamericana de automática e Informática Industrial. ISSN: 1697-7912, vol 4, no. 2, pp. 7-25.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)