

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Diseño y Evaluación de los Controles de Velocidad por PID, RN, LD y MD de un Sistema Aerodinámico de Doble Rotor y un Motor de CD de Imanes Permanentes

JOEL J. ONTIVEROS M¹, JOSÉ A. ARROYO G¹, CARLOS D. AVALOS G¹, GUILLERMO J. RUBIO A¹

¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Culiacán. Culiacán, Sinaloa, México.
joelontiveros@itculiacan.edu.mx,
adol.arro.wo@gmail.com,
davidavalos1995@icloud.com,
guillermo.rubio@itculiacan.edu.mx

RESUMEN En este trabajo se presentan la simulación e implementación de 4 algoritmos de control: Proporcional, Integral y Derivativo, Lógica Difusa, Redes Neuronales y Modos Deslizantes, para controlar la velocidad de un motor de corriente directa de imanes permanentes. Se utilizan dos bancos de prueba para validar el funcionamiento de los controles, el primer banco es un prototipo que se diseña con una etapa de acondicionamiento de señales y fuerza, un Arduino DUE para la adquisición de datos y sensores para la medición en la salida del motor. El segundo banco de pruebas es un equipo comercial que se conoce como sistema aerodinámico de doble rotor multi-entradas - multi-salidas. Se tiene la limitante que desde fábrica se programa con parámetros definidos, lo que no permite cambios en los algoritmos de control internos, a diferencia del prototipo que no tiene limitación en los parámetros de implementación. Los resultados muestran la versatilidad de probar diferentes controles con un sistema de bajo costo, lo que permite seleccionar el mejor controlador para cada aplicación del motor CD de imanes permanentes.

PALABRAS CLAVE Control, Motor de CD, TRMS.

I. INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente directa de imanes permanentes (MCDIP) se utilizan en sistemas de control para propósitos de análisis, esto porque son pequeños, sencillos de utilizar, tienen alta relación par-volumen y bajo costo. Sin embargo, la aplicación de técnicas de control adecuadas sobre este dispositivo es necesaria para mejorar su desempeño [1]. Por este motivo, en los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas que se utilizan de manera efectiva para la solución de problemas de control. Entre estas técnicas se encuentran las siguientes: el control convencional proporcional-integral-derivativo (PID), controles robustos como modos deslizantes (MD) y controles inteligentes como los sistemas difusos y las redes neuronales (RN). El PID es un controlador simple y fácil de diseñar, cuenta con 3 parámetros sintonizables, la acción proporcional, el tiempo de integración, y el tiempo de derivación. El MD es un controlador discontinuo que funciona mediante la acción de interrupciones en alta frecuencia [2]. Los controladores de lógica difusa (LD) son capaces de lidiar con las incertidumbres

e imprecisiones del modelo de la planta a controlar, ya que el diseño del algoritmo de control se basa en el conocimiento del experto sobre la dinámica de la planta. Los controladores por redes neuronales son sistemas aproximadores que emulan en una parte muy simple el funcionamiento del cerebro humano [3].

Trabajos precedentes muestran el procedimiento para el diseño de un solo controlador para los MCDIP como en [4] y [5], o presentan la comparación del desempeño de dos tipos de controladores [6]. A diferencia de estos, en el presente trabajo se propone el diseño de 4 diferentes algoritmos de control de velocidad, con la finalidad de evaluar el desempeño de los controladores. Estos se implementan en 2 bancos de prueba. El banco de prueba 1 es un prototipo donde se implementan los controladores para el MCDIP. El banco de prueba 2 es un equipo comercial de una plataforma para realizar experimentos de control sobre un sistema que simula un helicóptero, con lo cual queda comprobada la versatilidad de los bancos de prueba.

El presente trabajo se desarrolla en IX secciones. En la sección II se presentan los prototipos que se utilizarán en el

trabajo y en la sección III se obtiene el modelo matemático del MCDIP. En la sección IV se describe el diseño del algoritmo de control PID y en la sección V el algoritmo de control por Lógica Difusa. Por otro lado, en la sección VI se muestra el desarrollo del algoritmo de control por Redes Neuronales, mientras que en la sección VII se presenta el control por Modos Deslizantes. Las gráficas con los resultados de simulación e implementación de los controladores para el MCDIP se muestran en la sección VIII y finalmente, en la sección IX se presentan las conclusiones del trabajo.

II. PROTOTIPOS

A. BANCO DE PRUEBA 1

Es un prototipo que se utiliza para implementar los algoritmos de control de velocidad y posición del MCDIP, donde el protocolo de comunicación entre la computadora y la tarjeta es a través del puerto serie. La tarjeta Arduino DUE adquiere los datos de la velocidad con el sensor infrarrojo que contiene un comparador de voltaje LM339. Los algoritmos que se ejecutan en el entorno Simulink de MATLAB generan los pulsos de voltaje, los cuales se amplifican en el puente HLMD18200 para controlar el motor, como se muestra en la Fig. 1.

B. BANCO DE PRUEBA 2

Es un sistema aerodinámico con doble rotor multi-entradas - multi-salidas (TRMS por sus siglas en inglés) diseñado como una plataforma de pruebas de laboratorio para aplicaciones de control, marca *Feedback Instruments Ltd.* [7]. El sistema posee un acoplamiento colectivo entrecruzado (rotor principal) y el rotor de cola como un helicóptero. Algunos de sus valores de salida y estados no se pueden medir de manera directa [7]. La Fig. 2 muestra el TRMS que se utiliza en este trabajo.

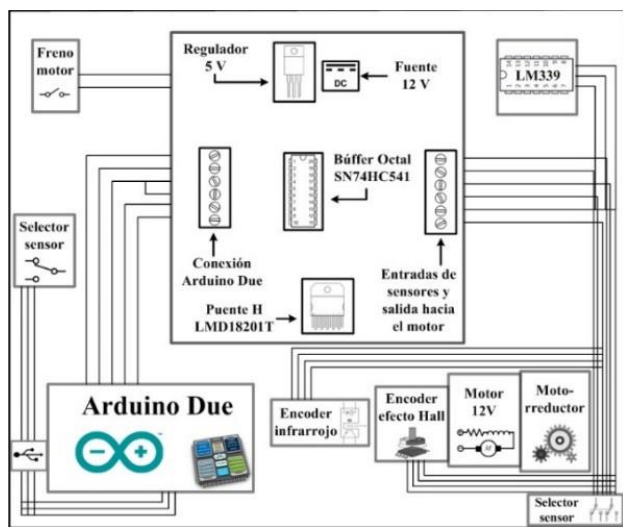


Fig. 1. Banco de prueba para algoritmos de control de velocidad y posición del MCDIP.

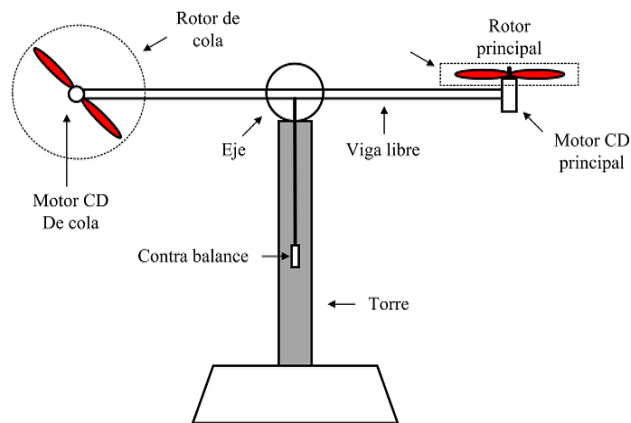


Fig. 2. Sistema aerodinámico de doble rotor multi-entradas - multi-salidas [7].

III. MODELO MATEMÁTICO DEL MCDIP

En los bancos de prueba 1 y 2, el elemento principal es el MCDIP. Para diseñar del control PID y el control por Modos Deslizantes de estos motores, se requiere determinar el modelo matemático que describa la dinámica de su comportamiento. El modelo matemático se obtiene a partir del circuito equivalente que se presenta en la Fig. 3.

De acuerdo con la Fig. 3, la ecuación para la armadura, y la ecuación mecánica son:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + KE \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{B}{J} \omega(t) + \frac{KM}{J} i(t) \quad (2)$$

donde R es la resistencia de armadura, i es la corriente de armadura, L es la inductancia de armadura, KE es la constante de voltaje, θ es la posición del motor, $\omega(t)$ es la velocidad del rotor, B es el factor de fricción viscosa, J es la inercia del rotor y KM es la constante del motor.

A partir de las ecuaciones (1) y (2) se expresa la función de transferencia en la ecuación (3) [8].

$$\frac{\omega(S)}{v(S)} = \frac{KM}{S^2 JL + S(JR + LB) + BR + KMKE} \quad (3)$$

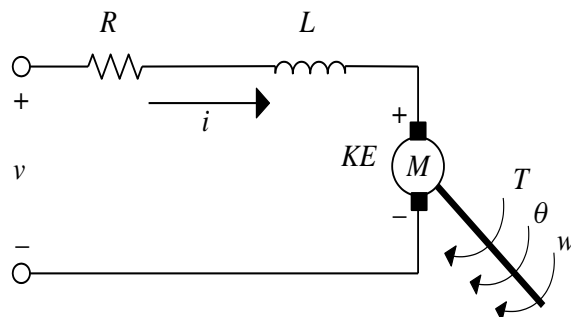


Fig. 3. Modelo de un motor de CD.

Los parámetros del motor de CD correspondientes a los bancos de prueba 1 y 2 se muestran en la Tabla I.

IV. CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

El algoritmo de control PID es descrito por las ecuaciones definidas como (4). Los parámetros que modifican el comportamiento y respuesta de la ecuación para cumplir con los objetivos de control son: la ganancia K , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d [9].

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad e = y_{sp} - y \quad (4)$$

Se propone utilizar el segundo método de sintonización de Ziegler-Nichols, para obtener los valores de los parámetros K , T_i , T_d . Este método tiene como objetivo definir la ganancia crítica K_{cr} y la frecuencia de oscilación, las cuales se muestran en la Tabla II. Como siguiente paso, los valores de los parámetros para el control PID (K , T_i , T_d) se determinan según Ziegler-Nichols, considerando una sintonización manual como se muestran en la Tabla III [9].

El sistema a bloques del control PID se presenta en la Fig. 4, donde u es la señal de control; e es la señal de error; Y_{sp} , es la referencia de entrada; y y es la salida del sistema.

TABLA I. PARÁMETROS DE LOS MOTORES DE LOS BANCOS DE PRUEBA.

Parámetro	Banco de prueba 1	Banco de prueba 2
Voltaje de la fuente (V)	12 V	12 V
Constante del motor (KM)	0.184 Nm	0.051 Nm
Constante de voltaje (KE)	0.011 Nm/A	0.051 Nm/A
Resistencia de armadura (R)	1.17 Ω	2.10 Ω
Inductancia de armadura (L)	0.58 mH	0.157 mH
Factor de fricción viscosa (B)	1.34e-6 NM	1.31e-3 NM
Inercia del rotor (J)	1.62 e-6 Kgm ²	9.089 e-4 Kgm ²
Velocidad nominal (ω)	80 RPM	3200 RPM

TABLA II. VALORES DE LA GANANCIA CRÍTICA Y PERIODO CRÍTICO DE ACUERDO CON EL SEGUNDO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS.

	Banco de prueba 1	Banco de prueba 2
K_{cr}	0.011	0.4292
P_{cr}	0.0123	0.0512

TABLA III. VALORES DE LAS CONSTANTES SINTONIZADAS MANUALMENTE PARA EL CONTROL PID.

	Banco de prueba 1	Banco de prueba 2
K	0.666	15
T_i	6.15	20.24
T_d	0.00154	0.000536

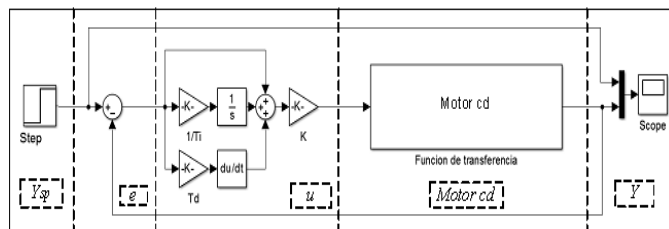


Fig. 4. Simulación del control PID en Simulink de MATLAB.

V. CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

Para el diseño de las reglas lingüísticas se utiliza la herramienta *fuzzy* de MATLAB, en la que el motor de inferencia es del tipo Mamdani, el cual emplea variables lingüísticas que facilitan el diseño del control. En la Fig. 5 se muestra el proceso, con un diagrama de bloques, para realizar el control difuso [10].

Una vez que se determinan cuáles son las entradas y salidas, se establece la referencia para definir el sistema de control. Para utilizar el control se desarrollan las descripciones lingüísticas que se definen por el *experto* que conoce el proceso a controlar. Las reglas lingüísticas que describen el comportamiento del controlador son del tipo *si-entonces* (*If-Then*).

Las reglas que se utilizan en la presente aplicación se proponen a partir de la suposición: si la velocidad del eje del motor es muy lenta, entonces acelera rápido (error es grande positivo), si la velocidad del eje es demasiado rápida, entonces desacelera rápido (error es grande negativo), si la velocidad del motor es la de referencia (el error es cero), entonces no se aplica control. Con dichas suposiciones se crea el conjunto de reglas para el control de velocidad básico; sin embargo, al añadir más reglas entre el error cero y el error grande positivo, así como entre el error cero y el error grande negativo, se crean reglas que mejoran la respuesta y por lo tanto se obtiene un control más fino. En la Tabla IV se presentan las reglas para ambos bancos de pruebas.

Al establecer las reglas que controlan el sistema, se diseñan las funciones de membresía. Estas funciones cuantifican de forma continua la pertenencia de un valor con respecto a alguna de las definiciones de las reglas mostradas en la Tabla IV. La Fig. 6 muestra las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas, con los rangos máximos y mínimos de la Tabla V [9].

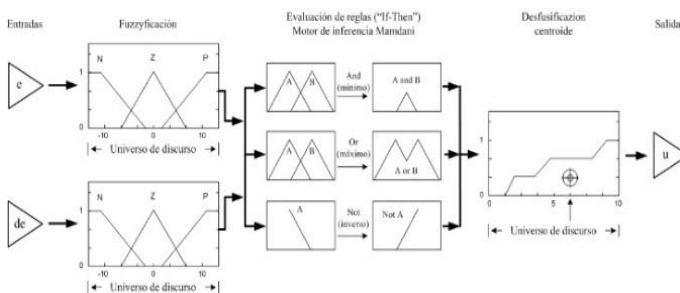


Fig. 5. Diagrama a bloques control difuso.

TABLA IV. CONJUNTO DE REGLAS.

		e								
	MN	MN	MAN	MEN	PN	Z	PP	MEP	MAP	MP
	MN	MAN	MN	MAN	MAN	MEN	MEN	PN	PN	Z
	MAN	MN	MAN	MAN	MEN	MEN	PN	PN	Z	PP
	MEN	MAN	MAN	MEN	MEN	PN	PN	Z	PP	PP
de	PN	MAN	MEN	MEN	PN	PN	Z	PP	PP	MEP
	Z	MEN	MEN	PN	PN	Z	PP	PP	MEP	MEP
	PP	MEN	PN	PN	Z	PP	PP	MEP	MEP	MAP
	MEP	PN	PN	Z	PP	PP	MEP	MEP	MAP	MAP
	MAP	PN	Z	PP	PP	MPN	MEP	MAP	MAP	MP
	MP	Z	PP	PP	MEP	MEP	MAP	MAP	MP	MP

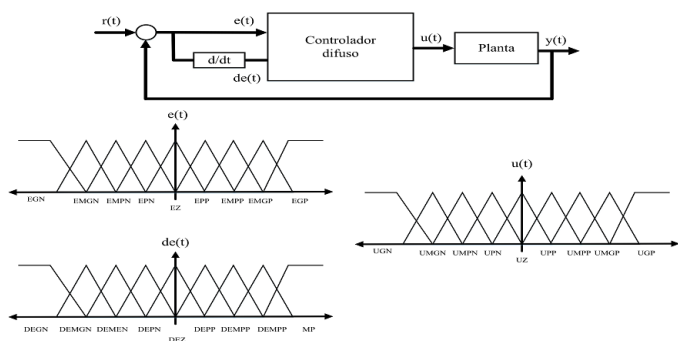


Fig. 6. Funciones de membresía.

El motor de inferencia toma valores con base en el tipo de operación que se realiza sobre las funciones de membresía, las cuales pasan a través de la *defuzzificación* y los transforma en acciones para controlar la planta. Al implementar las reglas de la Tabla IV y las reglas de condición lingüísticas “If-Then” se obtienen superficies como la que se muestra en la Fig. 7. Con un mayor número de reglas la superficie se vuelve más uniforme y es proporcional al resultado del control.

TABLA V. RANGOS DEL UNIVERSO DE DISCURSO PARA LAS FUNCIONES DE MEMBRÉSIA.

	Banco de prueba 1	Banco de prueba 2
Mínimo	0	-3000
Máximo	255	3000

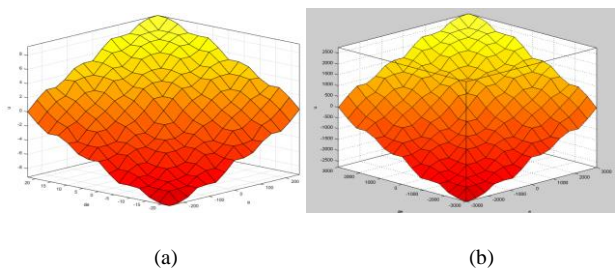


Fig. 7. Superficie de reglas difusas. (a) Banco de prueba 1. (b) Banco de Prueba 2.

Una forma simple para mejorar el desempeño del controlador difuso es a través del escalamiento del universo de discurso, este consiste en añadir tres ganancias, g_0 , g_1 y h , al cambiar sus valores para sintonizar el control, de tal forma que se obtenga una mejor respuesta. La forma de aplicarlo es como se muestra en la Fig. 8.

VI. REDES NEURONALES

Para la aplicación del control por redes neuronales se utiliza el toolbox *nntstart* de MATLAB, así como las herramientas *Fitting app* o *Function fitting (nftool)* [11]. La herramienta crea una relación entrada-salida al definir una función que imita ese comportamiento, esto se hace con la finalidad de obtener una red neuronal y crear el bloque de control de velocidad. El bloque de la red neuronal se diseña en 6 etapas:

- Etapa 1: Recolección de datos, indispensables para elaborar la red neuronal. Dichos datos se obtienen del controlador LD Fig. 9.
- Etapa 2: Asignación de los datos al entrenamiento, validación y pruebas Tabla VI.
- Etapa 3: Diseño de la arquitectura de la red. Se define el número de neuronas en la capa oculta Tabla VI.
- Etapa 4: Entrenamiento de la red. Se selecciona el método de entrenamiento Tabla VI.
- Etapa 5: Evaluación de los resultados y desempeño de la red, Tabla VI.
- Etapa 6: Generación del bloque para implementar la red (*gensim*).
- Etapa 7: Aplicación de la red neuronal.

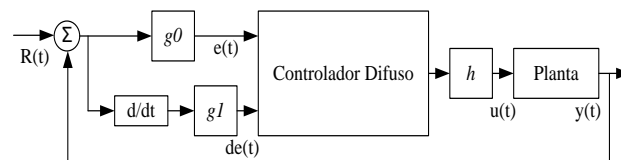


Fig. 8. Controlador difuso con ganancias de escalamiento g_0 , g_1 , y h [10].

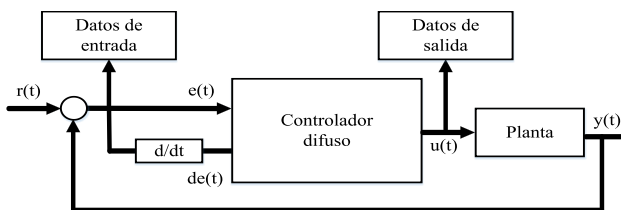


Fig. 9. Recolección de datos.

TABLA VI. DATOS DE ENTRENAMIENTO.

	Banco de prueba 1	Banco de prueba 2
Entrenamiento	70%	70%
Validación	15%	15%
Prueba	15%	15%
Núm. de neuronas CO	10	10
Método de entrenamiento	Levenberg-Marquardt backpropagation	Levenberg-Marquardt backpropagation
Número de interacciones	163	23

VII. CONTROL POR MODOS DESLIZANTES

Para el diseño de un controlador por MD se tiene que la velocidad se representa por medio de ω , mientras que ω^* es la referencia; por lo tanto, la señal de error es $e = \omega^* - \omega$. Las variables de estado se representan a través de $x_1 = e$, $x_2 = \dot{e}$ y $v(t) = u$, es la entrada de la señal de control [12]. Para el diseño del control de velocidad por MD, se parte de la función de transferencia (3) y se obtiene la ecuación de segundo orden (5). La superficie deslizante propuesta se define como (6) y el control por medio de la Ecuación (7).

$$\ddot{\omega} + (a_{b2} + a_{b3})\dot{\omega} + [(a_{b2}a_{b3}) + a_{b4}]\omega = a_{b1}u_b \quad (5)$$

$$S_b = C_b\sigma_{b1} + \sigma_{b2} \quad (6)$$

$$u_{smb}(t) = K_b \text{sign}(s_b) \quad (7)$$

dónde: $K_b, C_b > 0$; $\sigma_{b1} = \omega^* - x_1$ y $\sigma_{b2} = -x_2$.

Para determinar la condición en la que se lleva a cabo el modo deslizante se utiliza la condición (8), en donde la ganancia b_{b3} se selecciona de tal forma que sea $\dot{S}S < 0$ [12].

$$b_{b3} > |(b_{b1}x_1) + (b_{b2}x_2)| \quad (8)$$

donde $b_{b1} = [(a_{b2}a_{b3}) + a_{b4}]$, $b_{b2} = [(a_{b2} + a_{b3}) - C_b]$ y $b_{b3} = a_{b1}K_b$.

Para el Banco de prueba 1, el control equivalente se define como (9).

$$u_b = \frac{1}{a_{b1}} [b_{b1}x_1 + b_{b2}x_2 + b_{b3}\text{sign}(s)] \quad (9)$$

Los valores de las constantes de las ecuaciones (6) y (7) son: $C_b = 100$ y $K_b = 0.005111$.

Para el Banco de prueba 2 se diseña un controlador por MD con constantes de ganancia diferentes, esto porque el Banco de prueba 2 tiene un paso de integración mínimo limitado a 0.002s, lo cual no permite la aplicación del control equivalente. El control por MD se propone de la forma siguiente:

$$U_b = K_2 \cdot \text{sign}(s_b) \quad (10)$$

donde $K_2 = 003311$.

VIII. RESULTADOS

A. BANCO DE PRUEBA 1

1. Simulación de controladores

En la Fig. 10 se observa que el control por Lógica Difusa es el más rápido, alcanza la referencia y la mantiene en estado estable.

2. Implementación de controladores

La implementación se observa en la Fig. 11, donde la mejor respuesta se obtiene con el controlador por Modos Deslizantes, debido a que se alcanza la referencia de manera suave y una vez que llega se mantiene sin transitorios. En la Fig. 12 se muestran las señales de error; como es de esperarse, el controlador que exhibe un menor error es el controlador por Modos Deslizantes.

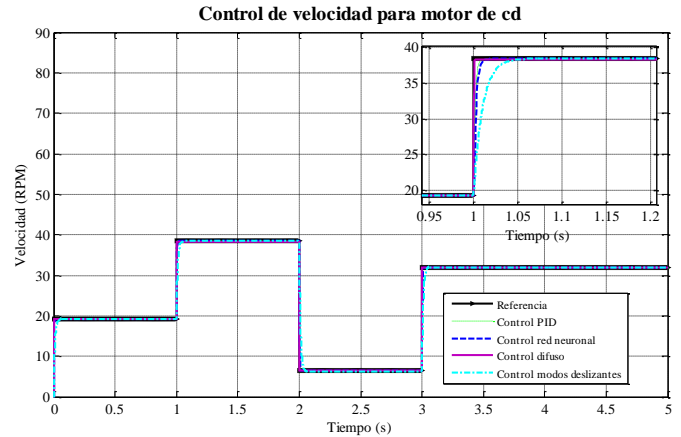


Fig. 10. Comparación de las simulaciones del motor de CD de imanes permanentes al controlar la velocidad con las estrategias PID, RN, LD y MD.

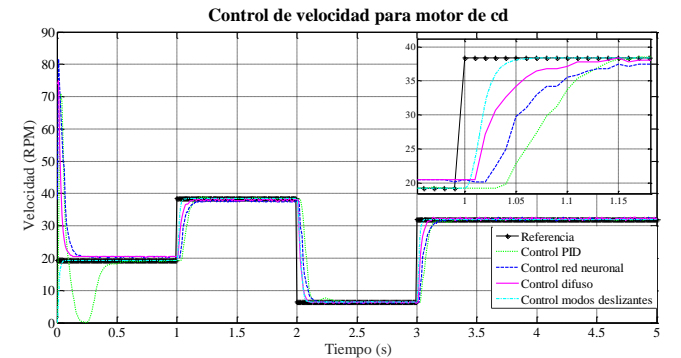


Fig. 11. Comparación de la implementación del control de velocidad en el motor de CD de imanes permanentes con las estrategias PID, RN, LD y MD.

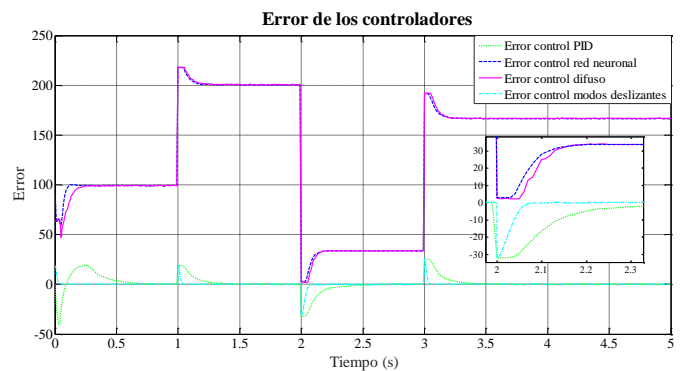


Fig. 12. Comparación de señales de error obtenidas con la implementación del controlador en el motor de CD de imanes permanentes con las estrategias PID, RN, LD y MD.

B. BANCO DE PRUEBA 2

1. Simulación de controladores

En la Fig. 13 se observa la comparación de las simulaciones del TRMS al controlar la velocidad.

2. Implementación de controladores

Se utiliza el mismo modelo tanto para las simulaciones del prototipo 1 y como del TRMS, solo se varían los parámetros característicos de cada motor. En la Fig. 13 se muestran las simulaciones del motor de CD de imanes permanentes del equipo TRMS con los diferentes controladores, en la figura se observa que el control por MD tiene una mejor respuesta, ya que sigue de manera puntual a la señal de referencia. Los resultados de la implementación se muestran en la Fig. 14, mientras que las señales de error de los controladores generadas a partir de la implementación se presentan en la Fig. 15, donde es posible observar que el control por Lógica Difusa tiene mejor respuesta y la magnitud del error es menor.

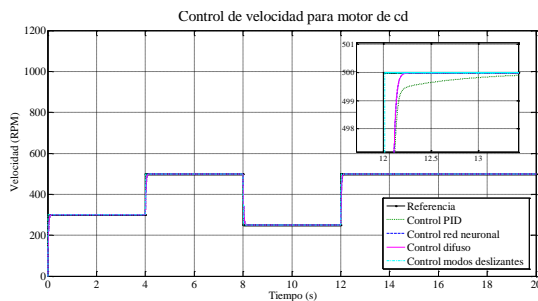


Fig. 13. Comparación de las simulaciones del TRMS al controlar la velocidad con las estrategias PID, RN, LD y MD.

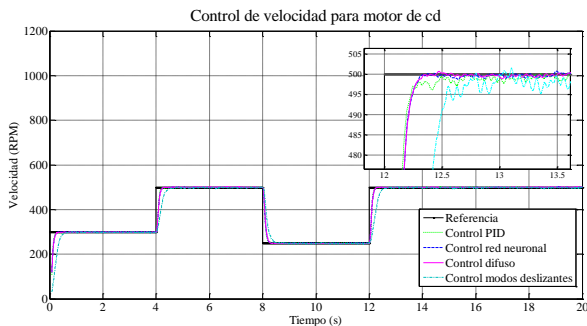


Fig. 14. Comparación de la implementación del control de velocidad en el TRMS con los controladores PID, RN, LD y MD.

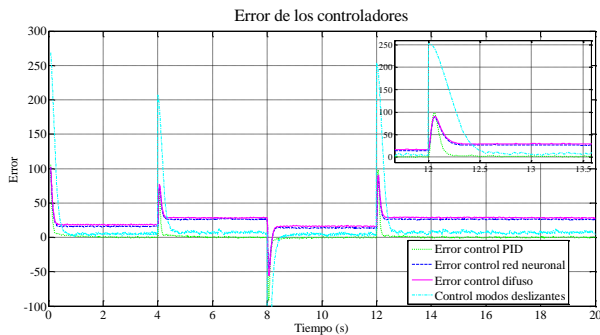


Fig. 15. Comparación de los errores que se producen en la implementación del control en el TRMS con PID, RN, LD y MD.

IX. CONCLUSIONES

A partir del modelo del motor de CD de imanes permanentes se diseñaron, simularon e implementaron 2 controladores: un controlador PID y un controlador por Modos Deslizantes. Los resultados muestran que el control PID se desempeña bien al controlar la velocidad del MCDIP para ambos bancos de prueba; sin embargo, el control por Modos Deslizantes presenta mejor desempeño. Asimismo, el diseño del controlador asegura que el MCDIP pueda controlarse de manera adecuada, siempre y cuando se cumplan las condiciones de estabilidad. Además, se diseñaron, simularon e implementaron dos controles inteligentes: uno por Lógica Difusa y otro por Redes Neuronales, de los cuales el que exhibió una mejor respuesta fue el control por Lógica Difusa, en el prototipo 1. El problema de estos controles es que requieren de gran cantidad de cálculos para poder controlar el MCDIP y este recurso solo lo brinda un equipo de cómputo avanzado, característica que dificulta la implementación en el campo. El TRMS tiene una limitación en cuanto a la adquisición y procesamiento de los datos, esto tuvo como consecuencia que no se pudiera implementar un control por Modos Deslizantes de manera efectiva, ya que no tiene la capacidad de cambiar las características internas para soportar altas frecuencias de conmutación.

REFERENCIAS

- [1] W. Djatmiko y B. Sutopo, «Speed Control DC Motor under Varying Load Using Phase-Locked Loop System,» de Proc. of the International Conf. on Electrical, Electronics, Communication and Information, Jakarta, 2001.
- [2] V. Utkin, J. Guldner y J. Shi, Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, Columbus, Ohio, USA: Taylor & Francis Group,, 2009.
- [3] P. Ponce Cruz, Inteligencia Artificial Con Aplicaciones en la Ingeniería, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2010.
- [4] J. Chotai y K. Narwekar, «Modelling and Position control of Brushed DC motor,» de 2017 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3), Mumbai, 2017.
- [5] S. Tir, O. Malik, A. Hamida, J. Cherif, Y. Bekakra y A. Kadrine, «Implementation of a Fuzzy Logic Speed Controller For a Permanent MAGnet DC Motor USING a Low-Cost Arduino Platform,» de The 5th International Conference on Electrical Engineering, Boumerdes, 2017.
- [6] E. Guney y M. Demir, «A comparative Velocity Control Study of Permanent Magnet Tubular Linear DC Motor by Using PID and Fuzzy-PID Controllers,» de ICCAD'17, Hammamet, 2017.
- [7] A. Rahideh y M. H. Shaheed, «Hybrid Fuzzy-PID-based Control of a Twin Rotor MIMO System,» de IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, 2006.
- [8] P. C. Krause y O. Wasynczuk, ELECTROMECHANICAL MOTION DEVICES, McClaren, 1989.
- [9] T. H. Karl Johan Aström, Control PID avanzado, K. J. A. y. T. Hägglund, Ed., Ribera del Loira, Madrid España: Pearson Educación S. A., 2009.
- [10] K. M. Passino y S. Yurkovich, Fuzzy Control, Menlo Park: Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- [11] B. R. Neerparaj Rai, «Neural Network based Closed loop Speed Control of DC Motor using Arduino Uno,» International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 4, n° 2, pp. 137-140, 2013.
- [12] U. Vadim, G. Jürgen y S. Jingxin, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.