

Aplicación de Técnicas Inteligentes de Control en un Motor de Corriente Directa Incluyendo Modulación por Ancho de Pulsos

R. Morales-Caporal, J. I. Paredes-Tabales, O. Sandre-Hernández,
E. Bonilla-Huerta y J. F. Ramírez-Cruz

Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Instituto tecnológico s/n, Apizaco, Tlax. C.P. 90300
rmcaporal@ieee.org. Tel: (01241) 41-7-20-10 ext. 138
Paper received on 14/06/12, Accepted on 03/09/12.

Resumen. En este trabajo, se presenta la aplicación de dos técnicas de inteligencia artificial (Lógica Difusa y Redes Neuronales Artificiales) para controlar la velocidad y la posición del eje de un motor de Corriente Directa (CD). Primero se muestra el diseño de un controlador clásico (Proporcional-Integral-Derivativo) con el que se realizan comparaciones, después se explica el diseño de los controles basados en inteligencia artificial. Se incluye una técnica de modulación de ancho de pulsos (basada en banda de histéresis) a la salida de los controladores, la cual es necesaria durante la implementación, ya que el motor debe ser accionado con dispositivos de electrónica de potencia. Las técnicas de control propuestas, el accionamiento electrónico y el motor se simulan digitalmente con la herramienta computacional Matlab/Simulink®. Los resultados simulados muestran que con las técnicas inteligentes de control se logra un mejor desempeño de la máquina en estado transitorio y estacionario, además se determina el controlador más factible para una posterior implementación digital.

Palabras Clave: Control de velocidad, control de posición, lógica difusa, modulación por ancho de pulsos, motor de CD, redes neuronales artificiales.

1 Introducción.

Los motores de CD son altamente usados en aplicaciones industriales, tales como en máquinas herramienta, empacadoras, enrolladoras, manipuladores robóticos, etc., donde se requiere un control de la velocidad, posición y par del eje del motor con un alto desempeño [1]. Tradicionalmente, estas variables de la máquina se han regulado con controladores clásicos (Proporcional-Integral [PI] o Proporcional-Integral-Derivativo [PID]), gracias a su bajo costo y su simplicidad.

Sin embargo, para sintonizar correctamente estos controladores es necesario obtener un modelo matemático y parámetros precisos de la máquina, los cuales se obtienen comúnmente “off-line”. Por lo tanto, cuando los parámetros de la máquina varían debido a su operación, estos controles pierden su sintonización y disminuye gradualmente su ajuste, dando como resultado un error incremental en las variables controladas [2]. Para corregir esto, se han propuesto diversas técnicas, entre las que destacan: control adaptivo [3], control repetitivo [4], sliding mode control [5], [6], control difuso [7]-[9] y control neuronal [10]-[12]. Sin embargo, puesto que estas últimas técnicas modernas de control se han implementado en máquinas diferentes, no es posible encontrar en la literatura una comparación real del desempeño que ofrece cada uno de los controladores antes mencionados en la misma máquina, sobre todo para el caso del control de la posición. Por eso, en este trabajo se analizan tres técnicas diferentes de control en la misma máquina, para evaluar su desempeño, además se incluye una técnica de modulación del ancho de los pulsos, ya que esta última parte representa una no linealidad en el sistema real.

2 Control Clásico de Velocidad y Posición del Motor de CD.

2.1 Modelo del Motor.

El modelo matemático de la máquina de CD de imanes permanentes bajo estudio puede escribirse como sigue [2]:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_a}{L_a} - \frac{R_a \cdot i_a}{L_a} - \frac{K_b}{L_a} \omega_m; \quad K_b = K \cdot \phi \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_b \cdot i_a}{J} - \frac{\tau_L}{J} = \frac{\tau_e}{J} - \frac{\tau_L}{J}; \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega_m \quad (2)$$

Donde K representa una constante proporcional que depende de la construcción física de la máquina, R_a , L_a e i_a , representan la resistencia, la inductancia, y la corriente de armadura respectivamente; K_b se define como la constantes del motor; τ_e y τ_L , representan el par electromagnético y el par de carga respectivamente; V_a , es el voltaje de armadura, J es la inercia del motor; ω_m y γ son la velocidad y posición angular del eje del rotor respectivamente.

2.2 Control Clásico.

En este trabajo se usa primero un controlador clásico PID para controlar la velocidad y la posición del eje de la máquina, ya que muestra mejor desempeño que un controlador PI. La ecuación matemática del controlador PID está dada por [13]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Donde $e(t)$ es el error entre el valor de referencia y la salida del sistema, $u(t)$ es la salida del controlador, K_p , K_i , K_d , son la ganancia proporcional, la ganancia integral y la ganancia derivativa respectivamente. En este caso, para determinar los valores de las ganancias del controlador se utilizaron las técnicas de sintonización de Ziegler-Nichols [13]. La Fig. 1a, muestra el diagrama de bloques del control clásico de velocidad; en esta figura se observa que la entrada del controlador es el error de la velocidad y su salida es la corriente de referencia i_a^* , la cual, a su vez se compara contra la corriente medida para generar la modulación del ancho de pulso por medio de un regulador de histéresis. El diagrama de bloques del controlador de la posición del eje del motor se muestra en la Fig. 1b, este tiene como entrada el error de la posición y como salida también la corriente de referencia i_a^* . La cual genera los pulsos para accionar la etapa de potencia, como en el caso anterior.

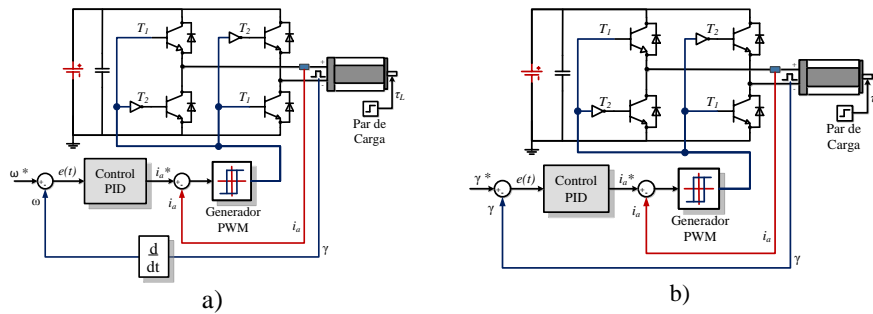


Figura 1. Diagrama de bloques del control clásico. a) De velocidad. b) De posición.

3 Control Inteligente de Velocidad y Posición del Motor de CD.

El Control Inteligente (CI) es una disciplina donde los métodos de control desarrollados tienden a emular características importantes de la inteligencia humana, entre las que se encuentran: adaptación y aprendizaje, respuesta óptima bajo altas incertidumbres, y hacer frente a grande cantidad de datos. El CI ha sido aplicado en áreas como robótica y automatización, comunicaciones, manufactura, control de tráfico, etc. En el control de máquinas eléctricas, la aplicación del CI, particularmente la lógica difusa y las RNA, ha demostrado ser una herramienta eficaz, sobre todo cuando hay variación de parámetros, variaciones en el par de carga o modos anormales de operación [14].

3.1 Control Difuso de Velocidad del Motor de CD.

El controlador difuso de velocidad del motor de CD contiene dos antecedentes y una consecuencia, el error de velocidad $e(t)$, la derivada del error $de(t)/dt$ y la corriente de armadura i_a respectivamente. El diagrama de bloques del controlador difuso de velocidad propuesto para el motor de CD se muestra en la Fig. 2a.

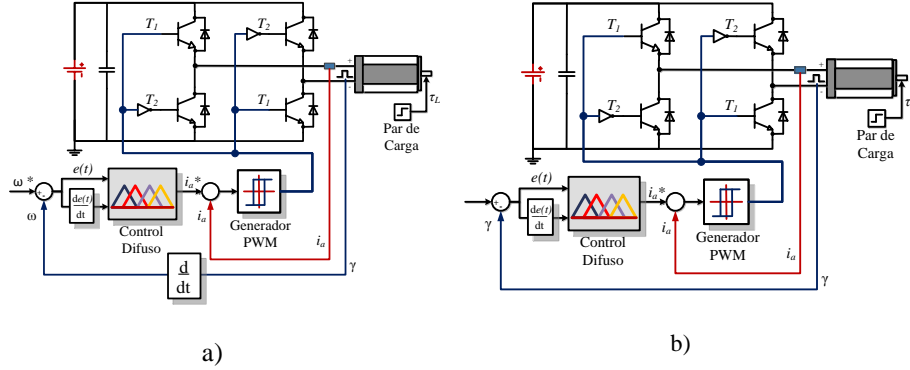


Figura 2. Diagrama de bloques del control difuso. a) De velocidad. b) De posición.

La estrategia de fuzzificación convierte las variables de entrada y salida en los siguientes conjuntos difusos: NG (Negativo Grande), NP (Negativo Pequeño), CE (Cero), PP (Positivo Pequeño), PG (Positivo Grande). Se han seleccionado funciones de membresía triangulares para cada uno de los cinco conjuntos difusos de cada variable [8]. En la Fig. 3 se observa los parámetros de las funciones de membresía de cada una de las variables. La base de reglas es determinada para cada uno de los conjuntos difusos de cada variable, y después de una optimización [2], se obtuvieron un total de 25 reglas difusas como se muestra en la Tabla 1.

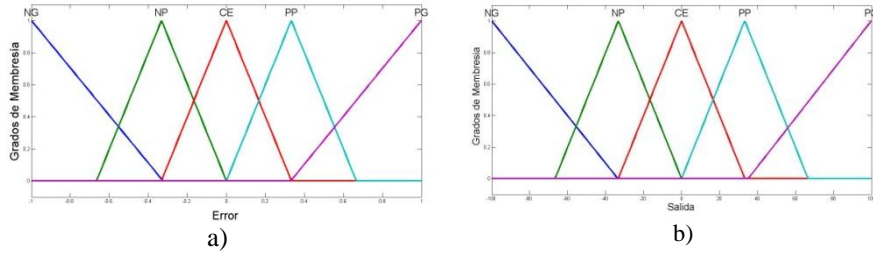


Figura 3. Funciones de membresía del control difuso de velocidad. a) Error y derivada del error. b) Salida control difuso (corriente de referencia i_a).

Tabla 1. Base de reglas del control de velocidad.

$\Delta e_{\omega}(k) \backslash e_{\omega}(k)$	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	NG
NP	NG	NG	NP	Z	PP
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NP	Z	PP	PG	PG
PG	PG	PP	PG	PG	PG

3.2. Control Difuso de Posición del Motor de CD.

El controlador difuso de posición del motor de CD contiene dos antecedentes y una consecuencia, el error de velocidad $e(t)$, la derivada del error $de(t)/dt$ y la corriente de armadura i_a respectivamente. El diagrama de bloques del controlador difuso de posición del motor de CD se muestra en la Fig. 2b.

La estrategia de fuzzificación convierte las variables de entrada y salida en los siguientes conjuntos difusos: NG (Negativo Grande), NP (Negativo Pequeño), CE (Cero), PP (Positivo Pequeño), PG (Positivo Grande). También, se han seleccionado funciones de membresía triangulares para cada uno de los cinco conjuntos difusos de cada variable. En la Fig. 4 se observa los parámetros de las funciones de membresía de cada una de las variables. La base de reglas utilizadas se muestra en la Tabla 1.

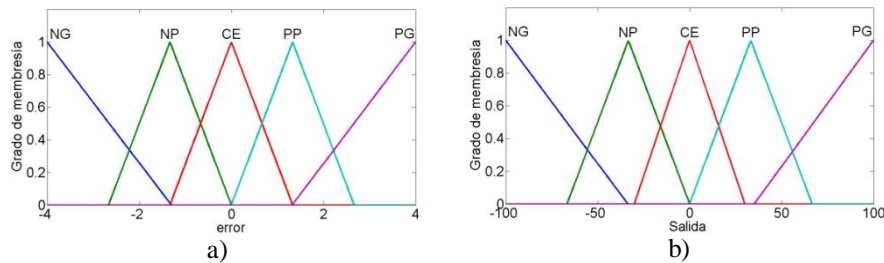


Figura 4. Funciones de membresía del control difuso de posición. a) Error y derivada del error. b) Salida control difuso (corriente de referencia i_a).

3.3 Control Neuronal de Velocidad del Motor de CD.

Las RNA tienen aplicaciones en la teoría de control, gracias a su capacidad de aprendizaje y adaptabilidad, de modo que es posible, entrenar una RNA para que emule el comportamiento de un controlador [10]. Últimamente, se han propuesto diversas arquitecturas de RNA para muchas aplicaciones de control industrial, siendo el control de máquinas eléctricas uno de los variados campos de aplicación.

Para controlar la velocidad del motor de CD se propone un neurocontrolador directo de tres capas, el diagrama de bloques del neurocontrolador propuesto se muestra en la Fig. 5a. Los datos de entrenamiento han sido tomados del controlador difuso, con los datos obtenidos se entrena la red por medio del algoritmo de retro propagación, las especificaciones del neurocontrolador se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del Neurocontrolador.

Especificaciones del Neurocontrolador	
Numero de Neuronas capa de Entrada	2
Numero de Neuronas capa de Salida	1
Numero de Neuronas capa Oculta	20
Ejemplos de Entrenamiento	5000
Numero de Épocas	1000

3.4 Control Neuronal de Posición del Motor de CD.

El neurocontrolador de posición tiene la misma arquitectura y entrenamiento que el neurocontrolador de velocidad (mostrados en la Tabla 2), sin embargo los datos de entrenamiento han sido tomados del controlador difuso de posición. El diagrama de bloques del neurocontrolador de posición se muestra en la Fig. 6b. Una vez entrenado el control basado en RNA, se sustituye en lugar del controlador difuso.

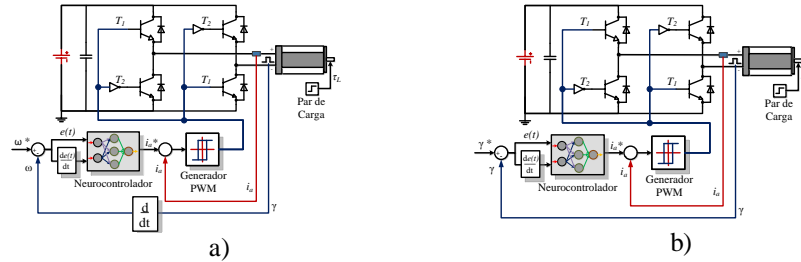


Figura 5. Diagrama de bloques del neurocontrolador. a) De velocidad. b) De posición.

4 Resultados.

Los parámetros del motor de CD utilizado en este trabajo se muestran en la tabla 3 y algunos programas desarrollados se muestran en el apéndice.

Tabla 3. Parámetros del motor de CD.

R_a	0.6Ω	J	1.2 Kg m^2
L_a	12 mH	K_b	1.8 Vs/rad
V_a	240V	T_L	29 Nm

4.1 Resultados de las Pruebas de Velocidad.

Para realizar las pruebas, se ajusta la velocidad de referencia a 60 rad/s . En $t=2.5 \text{ s}$, se aplica un par de carga de 8 Nm . La Fig. 6 muestra los resultados de la velocidad del motor de CD con los diferentes esquemas de control. La Fig. 6a muestra la señal de velocidad con el controlador PID, se observa que la velocidad de referencia es alcanzada rápidamente, y al aplicar el par de carga no se observa perturbación alguna. Las Figs. 6b y 6c muestran los resultados de la velocidad con el controlador difuso y neuronal respectivamente, se observa que la velocidad de referencia es alcanzada casi tan rápido como con el controlador PID, y también sin perturbarse al aplicar el par de carga. Las simulaciones demuestran que el control de velocidad, en este caso, no es un problema complejo, ya que tanto el control clásico, como el control inteligente, alcanzan la velocidad de referencia rápidamente, y aún cuando se aplica el par de carga, la velocidad del motor se mantiene en su referencia.

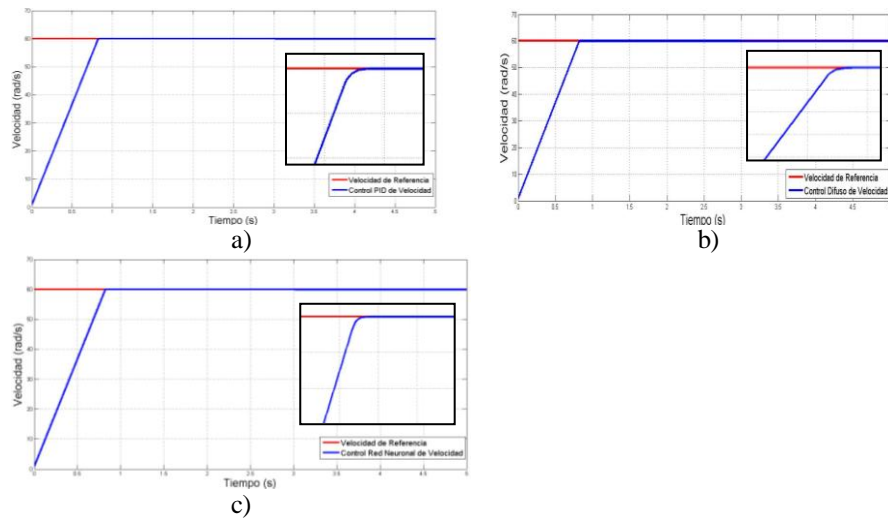


Figura 6. Simulación de la γ del motor de CD con control a) Clásico, b) Difuso, c) Neuronal.

4.2. Resultados de las Pruebas de Posición.

Para estas pruebas, se ajusta la posición de referencia a 2 rad. En $t=4$ s, se aplica un par de carga de 8 Nm. La Fig. 7 muestra los resultados de la posición del motor de CD bajo los diferentes esquemas de control propuesto. La Fig. 7a muestra la respuesta de la señal de posición del eje del motor con el control PID, se observa un sobretiro al momento de arranque, así como una caída en la posición de la máquina al aplicar el par de carga. La Fig. 7b y 7c muestran los resultados obtenidos del control de la posición del eje del motor de CD con control difuso y neuronal respectivamente. El controlador difuso muestra un mejor desempeño, puesto que no se observa un sobretiro que sobrepase la referencia, al momento de aplicar el par de carga la posición del eje de la máquina se mantiene en su referencia sin mostrar perturbaciones. Por último debido a que controlador neuronal fue entrenado tomando la salida del controlador difuso, la respuesta de la posición de la máquina es similar a la respuesta obtenida al aplicar el controlador difuso.

5 Conclusiones.

De acuerdo a los resultados de la simulación se puede concluir lo siguiente:

- El control de velocidad del motor de CD no representa un problema complejo, ya que el control clásico (PID), como el control inteligente (Difuso y RNA), muestran un desempeño satisfactorio manteniendo la velocidad del motor en la referencia aun durante un transitorio de carga.

- El control clásico de posición no presenta un buen desempeño, si considera un método complejo para obtener las ganancias del controlador PID, quizá el rendimiento del sistema mejore.
- El control difuso de posición es con el cual se obtiene un mejor desempeño al controlar la posición del motor, aunque presenta un pequeño sobrepaso al alcanzar la posición de referencia, no muestra una caída de posición durante la aplicación del par de carga.
- El control neuronal presente un buen desempeño tanto para la velocidad como para la posición, sin embargo, cuando se aplica el par de carga existe una pequeña diferencia respecto a la referencia, además, se necesita generar un conjunto de datos de entrenamiento para poder realizarlo, lo cual lo hace menos atractivo para su implementación.

Con las conclusiones obtenidas, es posible decir, que el mejor controlador para el motor de CD es el controlador difuso, lo cual lo hace el mejor candidato para su implementación en un sistema digital.

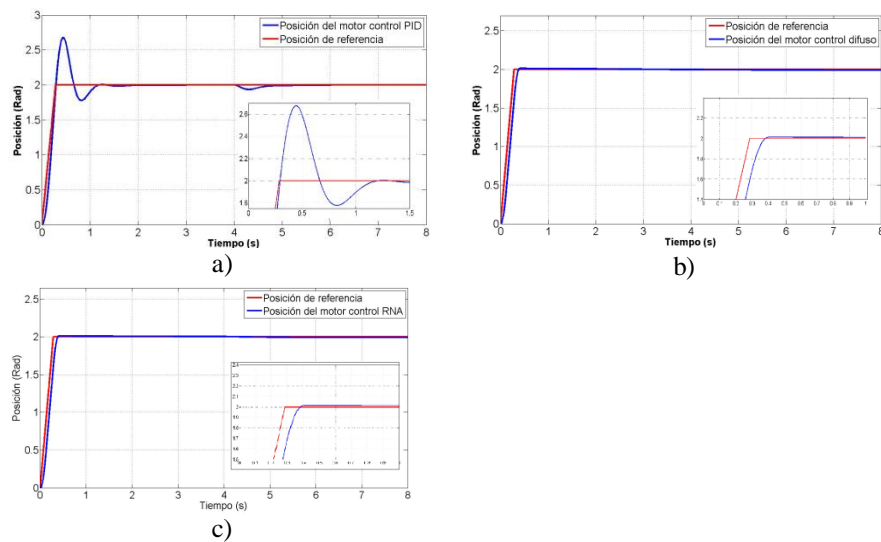
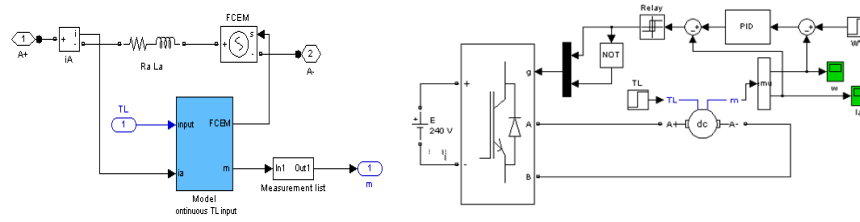


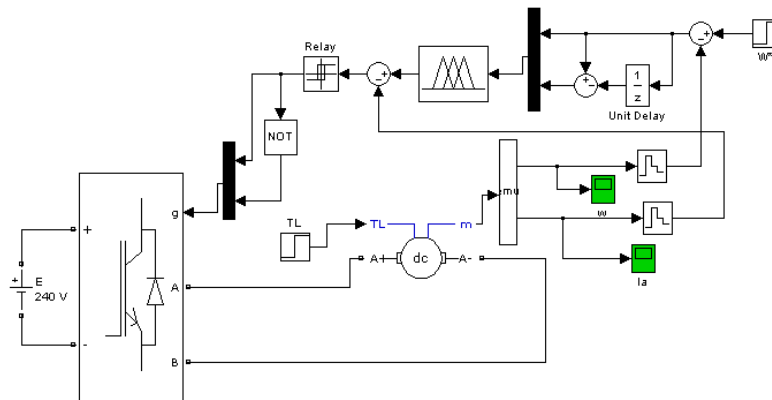
Figura 7. Simulación de la γ del motor de CD con control a) Clásico, b) Difuso, c) Neuronal.

Apéndice.

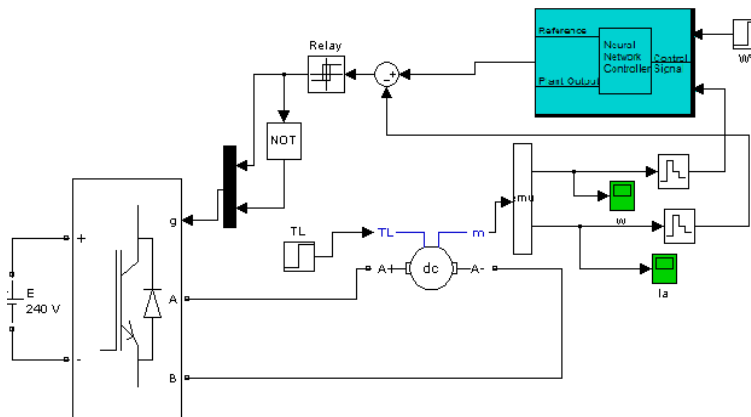
Programas en Matlab/Simulink



Motor de CD (MCD) de imanes MCD con control PID de velocidad permanentes



MCD de imanes permanentes con control difuso de velocidad, incluyendo modulación por ancho de pulsos.



MCD de imanes permanentes con control neuronal de velocidad, incluyendo modulación por ancho de pulsos.

Referencias.

1. R. Morales-Caporal, E. Bonilla-Huerta, and M. A. Morales-Caporal "DSP-Based Digital Torque/Motion Control of DC Motors for Direct-Drive Industrial Robotics Applications", In. Proc. IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2010). vol. 1. pp. 613-618. Cuernavaca, México, 2010.
2. I. Hernández, "Desarrollo de Diferentes Técnicas de Control Inteligente del Movimiento/Par de un Motor de Corriente Directa para Aplicaciones de Robótica Industrial,". Tesis de Maestría en S. C. Ins. Tec. de Apizaco, Tlaxcala, México 2011.
3. D. R. Tutakne, H. M. Suryawanshi, and S. G. Tarnekar, "Adaptive Pulse Synchronizing Control for High-Power-Factor Operation of Variable Speed DC-Drive" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 6, pp. 2499-2510. Nov. 2007.
4. W. Wu, "DC Motor Drive Speed Regulator: Using a Repetitive Control Application in a Flatbed Scanner" IEEE Industry Applications Magazine, vol. 18, no. 2 pp. 38-46. Mar/Apr. 2012.
5. B. M. Patre, V. M. Panchade and R. M. Nagarale. "Sliding Mode Control of DC Drives, Sliding Mode Control" Prof. Andrzej Bartoszewicz (Ed.), ISBN: 978-953-307-162-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/sliding-mode-control/sliding-mode-control-of-dc-drives>. 2011.
6. C. E. Castaneda, A. G. Loukianov, E. N. Sanchez, and B. Castillo-Toledo, "Discrete Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor with Controlled Flux" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 1192-1207. Feb. 2012.
7. F. Cupertino, A. Lattanzi, and L. Salvatore, "A New Fuzzy Logic-Based Controller Design Method for DC and AC Impressed-Voltage Drives", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp. 974-982. Nov. 2000.
8. R. Morales-Caporal, I. Hernández-Davila, E. Bonilla-Huerta and J. F. Ramírez-Cruz, "Control PI-Fuzzy de la Posición del Rotor de un Motor de Corriente Directa de Capacidad Industrial". Research on Computing Science, IPN, vol. 54. pp. 3-11. October 2010.
9. R. Malhotra and T. Kaur, "DC Motor Control Using Fuzzy Logic Controller", International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, vol. 8, n° 2, pp. 291-296, 2011. Available from: <http://www.ijaest.iserp.org/archieves/14-Jul-1-15-11/Vol-No.8-Issue-No.2/27.IJAEST-Vol-No-8-Issue-No-2-DC-MOTOR-CONTROL-USING-FUZZY-LOGIC-CONTROLLER-291-296.pdf>.
10. S. Weerasooriya, and M. A. El-Sharkawi, "Identification and Control of a DC Motor Using Back-Propagation Neural Networks," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 4, pp. 663-669. Dec. 1991.
11. G. M. Rao, and B. V. S. Ram, "A Neural Network Based Speed Control for DC Motor", International Journal of Recent Trends Engineering, vol. 2, no. 6, pp. 121-124. Nov. 2009.
12. R. Morales-Caporal, I. Hernández-Davila, E. Bonilla-Huerta y J. F. Ramírez-Cruz, "Control de Velocidad y Posición de un Motor de Corriente Directa Usando Lógica Difusa y Redes Neuronales Artificiales". 9o Congreso Intenacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2011). En CD. Paper. 636. 2011.
13. B. C. Kuo, *Sistemas de Control Automatico*, Prentice Hall, 1996.
14. Y. Kang, Y. Chen y M. Chu, "The Artificial Neural Network Applied to Servo Control Systems.", *New Developments in Robotics, Automation and Control*, InTech, 2008