

Control PI-Fuzzy de la Posición del rotor de un motor de Corriente Directa de Capacidad Industrial

Roberto Morales, Ivette Hernández, Edmundo Bonilla y J. Federico Ramírez

División de Estudios de Posgrado e Investigación.

Instituto Tecnológico de Apizaco.

Av. Instituto tecnológico s/n, Apizaco, Tlax. C.P. 90300

moralescaporal@hotmail.com, ivet_05_03@hotmail.com.

Paper received on 16/08/10, Accepted on 28/09/10.

Resumen. Los motores de corriente directa (CD) son usados a menudo en aplicaciones industriales tales como en robots, manipuladores y en otros sistemas accionados electrónicamente donde una amplia gama de control de velocidad y /o posición son necesarias. En este artículo se presenta el desarrollo y simulación de un controlador PI-Fuzzy de posición de un motor de CD. Usando un Control clásico PI y un Control Fuzzy en cascada es posible controlar la posición y la velocidad de una manera relativamente fácil, además de que facilita su implementación digital. Resultados simulados comprueban un buen desempeño del sistema y justifica el análisis teórico.

Palabras clave: Control fuzzy, control de posición, control de velocidad, lógica difusa, motor de CD.

1 Introducción

Las técnicas de inteligencia artificial se han convertido en una herramienta fundamental para tratar y modelar sistemas complejos incluyendo el área de Control Automático [1], [2]. El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su gran importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y análogos, el control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación. Sin embargo el control convencional sigue siendo utilizado en la mayoría de las aplicaciones industriales.

La inteligencia artificial tiene varias ramas, entre ellas se encuentra la lógica difusa. En la lógica difusa el adjetivo “difuso” se debe a que los valores de verdad utilizados tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. La lógica difusa permite definir valores intermedios en un intento por aplicar un modo de pensamiento similar al del ser humano [3]. El Control Fuzzy o Difuso se introdujo a comienzos de los años 70 como un intento para diseñar controladores para sistemas que son estructuralmente difíciles de modelar, debido a su naturaleza no lineal y a otras complejidades en la obtención del modelo. Durante los últimos años el Control Difuso ha emergido como una de las áreas de mayor investigación [4].

2 Fundamentos de la Lógica Difusa

La lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional que permite trabajar información con alto grado de imprecisión, en esto se diferencia de la lógica convencional que trabaja con información bien definida y precisa.

En las teorías tradicionales se obliga a que las representaciones del mundo real que se realizan encajen dentro de modelos muy precisos, tomando la imprecisión como un factor de distorsión.

2.1 Conjuntos Clásicos

Los conjuntos en la teoría clásica son altamente restrictivos en el sentido de que un elemento o pertenece o no pertenece a un conjunto dado.

Un conjunto clásico es una colección de elementos que clasifican objetos mediante alguna propiedad. Este tipo de conjuntos se definen mediante una función característica.

Dado un subconjunto A del universo X:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

$$\text{se define: } \mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \in A \\ 0, & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

es decir, si $\mu_A(x) = 1$, si la afirmación “ $x \in A$ ” es verdadera y si $\mu_A(x) = 0$, si la afirmación “ $x \in A$ ” es falsa.

2.2 Conjuntos Difusos

De manera intuitiva se tiene el concepto de conjunto como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto. La decisión, naturalmente, es “sí pertenece” o bien “no pertenece”. Un conjunto difuso se puede definir matemáticamente al asignar a cada posible individuo que existe en el universo de discurso, un valor que representa su grado de pertenencia o membresía en el conjunto difuso. Este grado de membresía indica cuando el elemento es similar o compatible con el concepto representado por el conjunto difuso.

Los conjuntos difusos son un instrumento adecuado para modelar los predicados inexactos de los lenguajes naturales [5].

2.3 Funciones de Pertenencia

La función de pertenencia de un conjunto nos indica el grado en que cada elemento de un universo dado, pertenece a dicho conjunto. Es decir, la función de per-

tenencia de un conjunto A sobre un universo X será de la forma: $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, donde $\mu_A(x) = r$ si r es el grado en que x pertenece a A [6].

Las funciones de pertenencia son una forma de representar gráficamente un conjunto borroso sobre un universo.

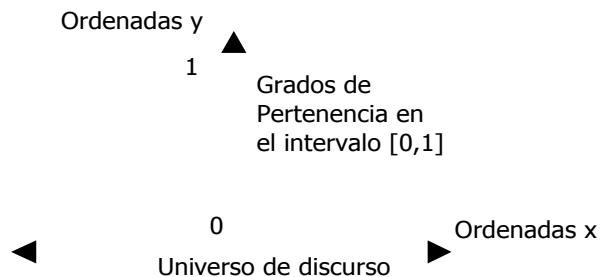


Fig. 1 Representación gráfica de un conjunto borroso sobre un universo.

A la hora de determinar una función de pertenencia, normalmente se eligen funciones sencillas, para que los cálculos no sean complicados. En particular, en aplicaciones en distintos entornos, en la figura 2 se muestran algunas funciones más utilizadas:

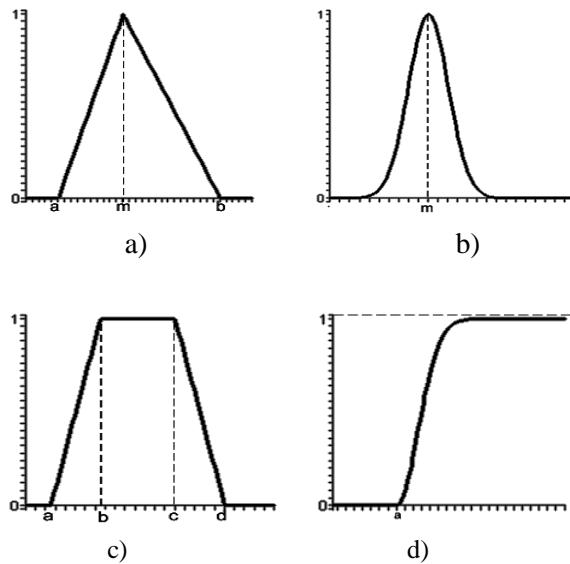


Fig. 2. Funciones de membresía más utilizadas. (a) Triangular, (b) Forma de Campana, (c) Trapezoidal, (d) Gama.

2.4 Operaciones de Conjuntos Difusos

Como ya se dijo, en la lógica difusa se emplean conjuntos, así que contamos con operaciones de complemento, unión e intersección. Cuando a dos variables difusas se les aplica una operación de “unión” (que en la lógica binaria es equivalente a una operación OR), el resultado se obtiene tomando el valor más grande de entre las variables de entrada, $\max X_1, X_2, \dots, X_n$.

Para el caso de la “intersección” (que equivale a la operación AND) el valor resultante de la operación corresponde al mínimo valor de alguna de las entradas: X_1, X_2, \dots, X_n .

En la operación “complemento” (equivale a una operación NOT), se toma el valor que complementa a 1, de esta forma:

$$x' = 1 - x \quad (3)$$

El principal beneficio de la lógica difusa es que con ella se puede describir el comportamiento de un sistema, mediante simples relaciones < si-entonces > o < if-then > éstas permiten describir el conjunto de reglas que utilizaría un ser humano para controlar el proceso con toda la imprecisión que poseen los lenguajes naturales y, solo a partir de estas reglas, generan las acciones que realizan el control. Por esta razón, también se les denominan controladores lingüísticos [7].

2.5 Estructura de un sistema difuso

Un sistema difuso consta de:

- a) Etapa de fuzzificación: ésta etapa se encarga de la transformación de las variables controladas entregadas por el proceso, en variables de tipo lingüísticas. Como resultado de la fuzzificación se obtiene valores lingüísticos medidos.
 - b) Reglas: contiene las reglas difusas que encierran el conocimiento necesario por la solución del problema de control. Las reglas de control constan de reglas si <condiciones> entonces <acciones>.
 - c) Máquina de inferencia: realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. En el presente trabajo se implementó el método de inferencia de Mamdani.
 - d) Defuzzificación: el resultado de la inferencia difusa es retraducido de un concepto lingüístico a una salida física gracias al proceso de defuzzificación.
- Por lo tanto, la figura 3 demuestra el diagrama general de un sistema difuso.

Cada una de las variables de entrada y de salida tiene una representación dentro del Sistema de Lógica Difusa en forma de Variables Lingüísticas. Una variable lingüística tiene, entre otras cosas, una colección de atributos que puede adquirir la variable, y cada atributo está representado por un conjunto difuso.

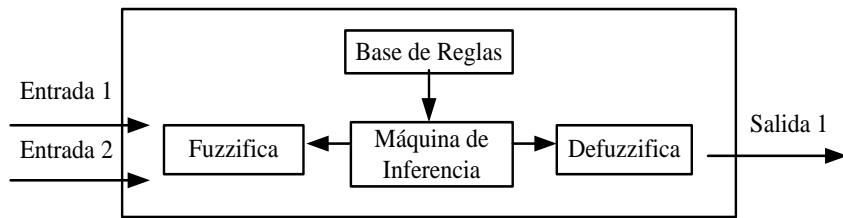


Fig. 3. Estructura de un sistema de Lógica Difusa.

3 Fundamentos de Sistemas de Control

Un Sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna) [8].

Los sistemas de control se clasifican en dos grandes categorías:

- Sistemas de lazo abierto.- Es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida.
- Sistemas de lazo cerrado.- Es aquel en el cual la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida, estos sistemas se llaman comúnmente, sistemas de control por retroalimentación.

En este trabajo se emplea el sistema de control de lazo cerrado como se puede ver en la figura 4 [8].

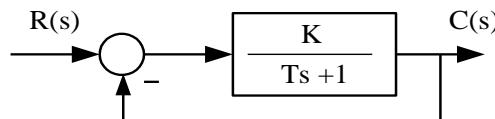


Fig. 4. Sistema en lazo cerrado.

4 Resultados de la simulación

La acción de control Proporcional Integral se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt. \quad (4)$$

en donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral.

Tanto K_p como T_i son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control [9]. El inverso del tiempo integral T_i se denomina

velocidad de reajuste. La figura 4 muestra un diagrama de bloques de un controlador proporcional más integral [8].

Para obtener los parámetros adecuados para el control PI se emplearon las conocidas reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, y se obtuvieron los siguientes resultados:

$$K_p = 11.58, T_i = 0.45$$

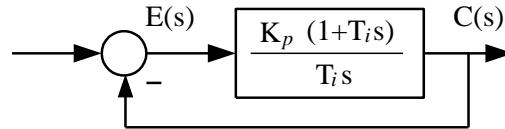


Fig. 5. Diagrama de bloques de un control proporcional-integral.

Las ecuaciones que rigen al motor CD con excitación son:

$$\frac{dI_f}{dt} = -\frac{R_f}{L_{ff}} I_f + \frac{1}{L_{ff}} V_f. \quad (5)$$

$$\frac{dI_A}{dt} = -\frac{R_A}{L_{AA}} I_A + \frac{L_{Af}}{L_{AA}} I_f \omega + \frac{1}{L_{AA}} V_A. \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J} \omega + \frac{L_{Af}}{J} I_f I_A - \frac{1}{J} T_L. \quad (7)$$

En la tabla siguiente se muestran ciertas especificaciones y parámetros que se tomaron en cuenta para el desarrollo del Control PI-Fuzzy [10].

Tabla 1. Especificaciones y parámetros de un motor de CD.

Especificaciones	
Potencia $P = 5$ Hp.	Voltaje de armadura $V_A = 240$ V.
Voltaje de campo $V_f = 240$ V.	Corriente de armadura $I_A = 39.58$ A.
Corriente de campo $I_f = 1.0$ A.	Velocidad $\omega = 120.14$ rad/seg.
Parámetros	
Induc. de armadura $L_{AA} = 0.012$ H.	Resistencia de armadura $R_A = 0.6 \Omega$.
Inductancia de campo $L_{ff} = 120$ H.	Resistencia de campo $R_f = 240 \Omega$.
Momento de inercia $J = 1.2$ kg- m ²	Inductancia mutua $L_{Af} = 1.8$ H.
Par externo de carga $T_L = 29.2$ n-m.	Fricción viscosa $B = 0.35$ kg- m ² /seg.

Las ecuaciones (5), (6) y (7) son ecuaciones diferenciales de primer orden que contienen los productos no lineales $I_f \omega$ e $I_f I_A$ de estas variables de estado.

En el controlador difuso se tienen dos variables de entrada: error $e(t)$ y cambio en el error $\dot{e}(t)$. La variable de error tiene 7 funciones de membresía. La variable de cambio en el error presenta también 7 funciones de membresía. La salida del controlador es la señal de control $u(t)$, el cual se ha dividido en 7 funciones de membresía. Una forma muy común de representar las reglas difusas, es mediante una representación en forma de matriz, conteniendo dos antecedentes que en este caso son $e(t)$ y $\dot{e}(t)$ y un consecuente $u(t)$.

Tabla 2. Reglas base.

\dot{e} / e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NS	PS	PB
NM	NB	NB	NM	NM	Z	PS	PB
NS	NB	NB	NS	NS	Z	PM	PB
Z	NB	NB	NS	Z	PS	PB	PB
PS	NB	NM	Z	PS	PS	PB	PB
PM	NB	NS	Z	PM	PM	PB	PB
PB	NB	NS	PS	PB	PB	PB	PB

Donde:

- NB = Negativo Grande
- NM = Negativo Mediano
- NS = Negativo Pequeño
- Z = Cero
- PS = Positivo Pequeño
- PM = Positivo Mediano
- PB = Positivo Grande

4.1 Simulación del Controlador Difuso

En la figura 6 se muestra el Controlador PI-Fuzzy de posición, el cual se implementó utilizando la herramienta MATLAB/SIMULINK [11].

En la figura 7 al realizar la simulación con el Control PI-Fuzzy, con una referencia de 0.2 rad se observa que cuando entra una carga de 1.2 N-m. en $t=5s$. hay una excelente reacción ya que se regula la posición llegando a su valor de referencia.

En la figura 8 al realizar la simulación con el Control PI-Fuzzy, con una referencia de 0.1 rad se observa que cuando entra una carga de 2.2 N-m. en $t=5s$. hay una perturbación pero después se regula la posición.

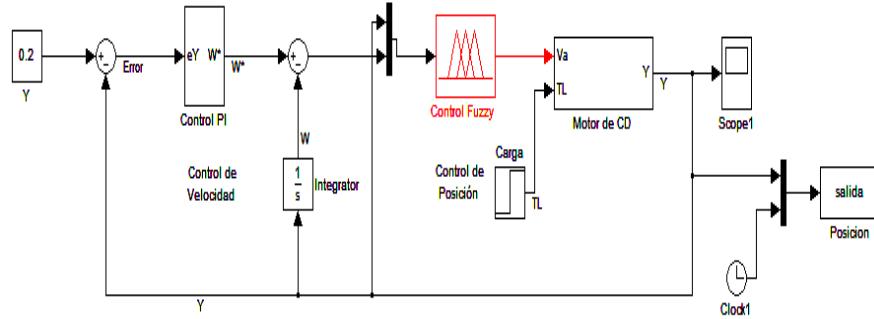


Fig. 6. Esquema de Control PI-Fuzzy propuesto.

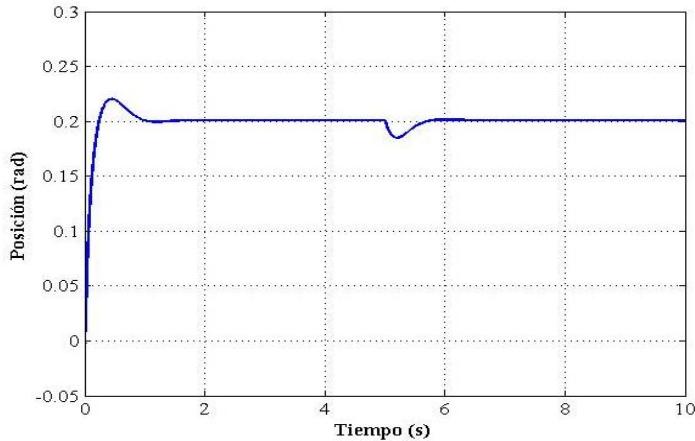


Fig. 7. Simulación del Control Difuso con un valor de referencia de 0.2 rad.

5 Conclusión

El Controlador PI-Fuzzy en cascada propuesto mejora el desempeño o la respuesta del sistema de control. En éste caso el control PI funciona como controlador de velocidad y su salida es usada como referencia del control difuso de posición. Esto se demuestra porque al inicio se llega a la referencia en un tiempo rápido y la recuperación del valor de referencia al arranque y a ciertos disturbios de carga, el control sigue la referencia.

Actualmente se está trabajando en la implementación digital del Controlador PI-Fuzzy usando en un DSP de Texas Instruments para controlar un manipulador industrial cuyos resultados serán reportados en un artículo futuro.

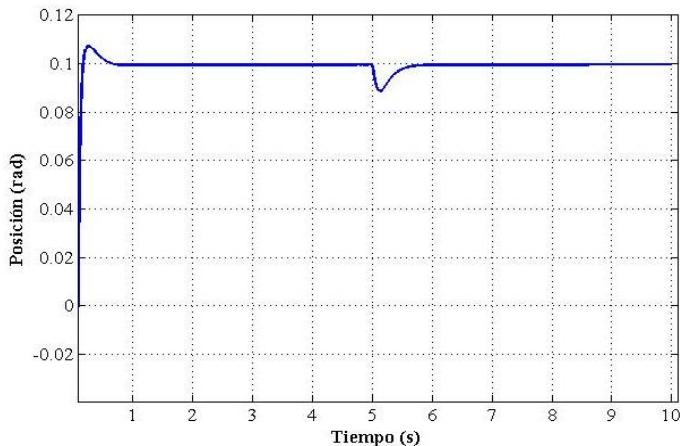


Fig. 8. Simulación del Control Difuso con un valor de referencia de 0.1 rad.

Referencias

1. C. V. Altrock, Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy applications explained, Prentice Hall, 1995.
2. C. V. Altrock, “Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Technologies in Appliances” Embedded System Conference, 1999.
3. Phongsak Phakamach, Control of a DC Servomotor Using Fuzzy Logic Sliding mode Model Following Controller, World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009.
4. WANG, Li-Xin, “Adaptive Fuzzy Systems and Control”, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.
5. Faraón Llorens, Lógica Multivaluadas o Polivalentes, Universidad Politécnica Superior de Alicante España. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. 2000.
6. Ahmed Rubaai, Senior Member, IEEE, Marcel J. Castro-Sitiriche, Student Member, IEEE, and Abdul R. Ofoli, Member, IEEE, Design and Implementation of Parallel Fuzzy PID Controller for High-Performance Brushless Motor Drives: An Integrated Environment for Rapid Control Prototyping, IEEE Transactions on industry applications, vol.44, No., July/August 2008.
7. Hopgood Adrian A., Intelligent System for Engineers and Scientists, CRC press, 2001.
8. Katsuhito Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 3a. Edición, Prentice Hall, 1998.
9. Karl Johan Astrom and Tore Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, ISA, 1988.
10. Leander W. Matsch and J. Derald Morgan, Electromagnetic and Electromechanical Machines, Third Edition, John Wiley and Sons, 1986.
11. MATLAB /SIMULINK AND POWER SYSTEM BLOCKSET, SIMULINK® Reference © COPYRIGHT 2002–2010 by The MathWorks, Inc.