

## Modelado difuso T-S de un motor de CD y diseño de una estrategia de control PI difuso con ganancias programables

PADRE-ÑONTHE, Juan David†\*\*, RAMOS-FERNÁNDEZ, Julio Cesar\*\*, MÁRQUEZ-VERA Marco Antonio', LAFONT Frederic''.

*'Universidad Politécnica de Pachuca*

*''Université de Toulon*

Recibido 4 de Septiembre, 2017; Aceptado 7 de Diciembre, 2017

### Resumen

El objetivo de éste trabajo es proponer una metodología para modelar motores de corriente directa (MCD) cuando no se tienen parámetros reales del sistema, usando la técnica de modelado difuso del tipo Takagi-Sugeno (T-S), ésta técnica se basa en la agregación de submodelos lineales o no lineales en los consecuentes de las reglas difusas del tipo SI-Entonces, de esta forma se obtiene una representación del MCD lo más apegado al comportamiento real de la máquina. Se aplican entradas escalón con diferentes valores de excitación al motor por medio de Modulación por ancho de pulso (PWM) para obtener una familia de respuestas. Las curvas de respuesta de velocidad son utilizadas para aproximar varias funciones de transferencia de primer orden que define la dinámica del sistema en diferentes puntos de operación. Posteriormente se realiza un controlador PI con ganancias programables difusas y se realiza un estudio comparativo con un controlador PI lineal para justificar una mejora en el desempeño del modelo T-S generado a partir de varias funciones de transferencia.

**Controlador PI, Controlador PI Ganancias programables, Modelo difuso Takagi-Sugeno.**

### Abstract

The objective of this work is to propose a methodology to model direct current (DCM) motors when no real system parameters are available, using the Takagi-Sugeno (TS) type diffuse modeling technique, this technique is based on the aggregation of linear submodels or non-linear in the consequent of the diffusive rules of type if-then. Thus, a representation of the DCM is obtained that is most closely related to the actual behavior of the machine. Step inputs with different excitation values are applied to the motor by means of Pulse Width Modulation (PWM) to obtain a family of responses. The velocity response curves are used to approximate several first order transfer functions that define the dynamics of the system at different points of operation. Subsequently, a PI controller with diffusible programmable gains is performed and a comparative study with a linear PI controller is performed to justify an improvement in the performance of the T-S model generated from several transfer functions.

**PI Controller, PI Controller Gain Scheduling, Takagi-Sugeno fuzzy model**

**Citación:** PADRE-ÑONTHE, Juan David †, RAMOS-FERNÁNDEZ, Julio Cesar, MÁRQUEZ-VERA, Marco Antonio, LAFONT, Frederic. Modelado difuso T-S de un motor de CD y diseño de una estrategia de control PI difuso con ganancias programables. Revista del Diseño Innovativo. 2017, 1-1: 44-52

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Corresponde al primer autor (david.padre@micorreo.upp.edu.mx)

## Introducción

Los motores de corriente directa (MCD) tienen múltiples aplicaciones en el sector industrial y en el ámbito de la robótica como lo indica en (Emhemed & Bin Mamat, 2012), tornos, máquinas de control numérico (CNC), debido a su versatilidad y la sencillez de manipular la velocidad y el sentido de giro, como lo realiza en (Petru & Mazen, 2015) regulando la velocidad por modulación por ancho de pulso PWM. Las aplicaciones más comunes son control de velocidad y posición. Para el diseño de un controlador para un (MCD) es necesario obtener su modelo matemático que permita representar su dinámica real y de esta manera usar algún método para obtener un controlador eficiente según la aplicación. Aunque existe varios modelos matemáticos en la literatura que representa la dinámica de los diferentes tipos de configuración de MCD los parámetros eléctricos y mecánicos difícilmente son proporcionados por el fabricante.

Es por ello que en varios trabajos se realiza la identificación de sistemas basado en métodos experimentales como el método de Strejc, Método de Latzel's (Tanda-Martinez, 2011) que aproxima una función de transferencia (FT) no periódico de orden superior, así como nuevos métodos para la identificación de sistemas en lazo abierto para sistemas sobre amortiguados descritos en (Mora & Amaya, 2017), de igual modo la identificación de sistemas por métodos paramétricos que son descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros de variables, que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salidas y perturbaciones).

Mediante estos datos se puede obtener un modelo no lineal junto con el uso de las herramientas de inteligencia artificial, como redes neuronales, algoritmos genéticos (AG) como lo desarrolla en (Aguado & Cipriano, 2009), redes neurodifusas, lógica difusa (Rivera Flores, 2007), mínimos cuadrados, ARX, ARMAX, cuyos métodos de identificación se describen en (Bueno, 2011) y el algoritmo genético adaptable (AGA) que se ilustra en (Tanda & Aguado, 2013).

De igual manera lógica difusa es empleado para el control de sistemas lineales y no lineales aplicados en trabajos de (Zaki, El-Bardini, Soliman, & Sharaf, 2015) realiza el control de velocidad de un MCD usando un controlador lógica difuso y control adaptable. En (Fidel et al., 2017) realiza la comparación de desempeño de varios controladores como el PID clásico, PID no lineal, el PID difuso ganancias programables, obteniendo buen desempeño de controlador PID difuso como controlador en regulación.

Por ello en este trabajo se propone una metodología para la obtención de un modelo difuso tipo Takagi-Sugeno (T-S) mediante la identificación de varias funciones de transferencia obtenidas en diferentes puntos de operación a diferentes entradas PWM para el control de velocidad de MCD a partir de datos reales obtenidos de forma experimental, permitiendo acercarse a las dinámicas más cercanas a las dinámicas reales del MCD y a partir del modelo obtenido se basa para obtener un controlador PI difuso con ganancias programables tomando en cuenta los controladores de cada función de transferencia en cada punto de operación.

## Desarrollo

El modelo matemático de un MCD se describe en varios artículos de la literatura como en (Sebastian & Alvarado, 2012) se presenta el modelo matemático de un motor DC separadamente excitado, pero para identificar la dinámica de un motor en la industria comúnmente se realiza mediante experimentación de ésta, cuya finalidad es aproximar a una función de transferencia que describe la dinámica del sistema alrededor del punto de operación como lo desarrollan en (Rairán-Antolines, Guerrero-Cifuentes, & Mateus-Pineda, 2010), que presenta un método de identificación paramétrica en los MCD, la respuesta ante una entrada escalón a lazo abierto se aproxima a una función de transferencia de orden N.

Para realizar la identificación del MCD en lazo abierto se utilizaron los siguientes materiales

## Metodología

### Materiales y Métodos

- Motor de DC 12 V con reducción de engranaje 80:1
- Fuente de voltaje de CD
- Encoder óptico de cuadratura 640 Pulsos por revolución acoplado al eje del motor
- Tarjeta para adquisición de datos (microcontrolador).

Normalmente los sistemas con dinámica rápida o subamortiguado son aproximados a un sistema de segundo orden, mientras que los sistemas de dinámica lenta son aproximados a uno de primer orden, las ecuaciones que rigen estas dinámicas son las siguientes.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

La ecuación (1) es la función de transferencia para sistemas de primer orden puro.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-sh} \quad (2)$$

La ecuación (2) es la función de transferencia para sistemas de primer orden con retardo.

$$G(s) = \frac{k}{(\tau s + 1)^n} \quad (3)$$

La ecuación (3) es la función de transferencia de sistemas de primer orden con polos reales múltiples.

Donde:

$K$ : Ganancia del sistema  $\frac{\Delta y}{\Delta u}$

$\tau$ : Constante de tiempo en alcanzar el 63.2% del valor máximo.

$e^{-sh}$ : función de retardo de la planta

$h$ : Constante de retardo

La función de transferencia de segundo orden esta da dado por.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k \omega_n^2}{s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

Donde:

$\omega_n$ : Frecuencia natural del sistema

$\zeta$ : Coeficiente de amortiguamiento

$k$ : Ganancia del sistema

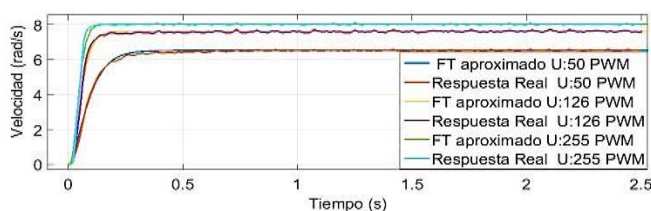
La dinámica de sistemas de segundo orden puede definirse como sobreamortiguado, críticamente amortiguado u subamortiguado, de acuerdo al coeficiente de amortiguamiento.

### Identificación de curvas de respuestas ante diferentes entradas

En el presente trabajo de identificación de un modelo difuso del MCD del tipo Takagi-Sugeno, se realizó con varios experimentos, se proponen tres entradas escalón PWM con amplitud diferente en lazo abierto para definir tres funciones de pertenencia, que represente la dinámica ante una entrada de excitación baja, media y alta, de esta forma se obtienen 3 dinámicas de velocidad en diferentes puntos de operación que abarca el dominio de trabajo de la máquina.

Cabe destacar que el motor está conectado a un puente H que permite el cambio de giro y la variación de velocidad mediante una entrada de modulación de ancho de pulso PWM. De esta manera la entrada de excitación ( $u$ ) al motor esta dado en relación al valor de PWM generadas por el microcontrolador con valor de 8 bits [0 – 255], donde el valor 255 representa el voltaje máximo aplicado al motor.

Los datos obtenidos de las respuestas del sistema, fueron graficados, y mediante el método de Strejc se aproxima a funciones de transferencia de primer orden. Los tres experimentos se aproximaron a una función de transferencia de primer orden.



**Gráfico 1** Curvas de velocidad del motor CD a diferentes entradas y sus respectivas aproximaciones de función de transferencia.

$$G_1(s) = \frac{0.1304}{(0.093s + 1)} \quad (5)$$

La ecuación (5) define la función de transferencia obtenida con una entrada control de PWM en este caso para el primer experimento el valor PWM=255.

$$G_2(s) = \frac{0.05997}{(0.0632s + 1)} \quad (6)$$

La ecuación (6) define la transferencia obtenida con una entrada de PWM=126.

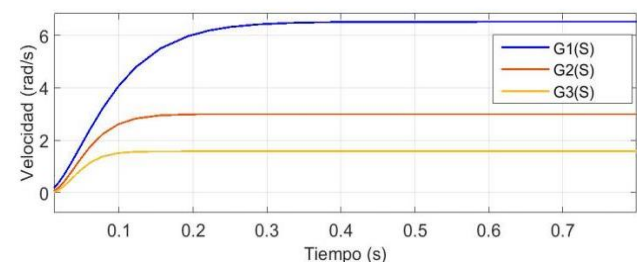
$$G_3(s) = \frac{0.03151}{(0.052s + 1)} \quad (7)$$

La ecuación (7) define la función de transferencia obtenida con una entrada de PWM=255.

A partir de la identificación de los funciones de transferencias del MCD mostrados en las ecuaciones (5), (6) y (7) se puede observar que, cuando la entrada es pequeña la respuesta es más lenta o sea ( $\tau$ ) es grande, también la ganancia ( $k$ ) es más grande.

La respuesta es más rápida si la entrada ( $u$ ) es grande y la ganancia ( $k$ ) disminuye.

Las funciones de transferencia describe la dinámica de sistemas lineales (sistema linealizado), alrededor de un punto de operación.



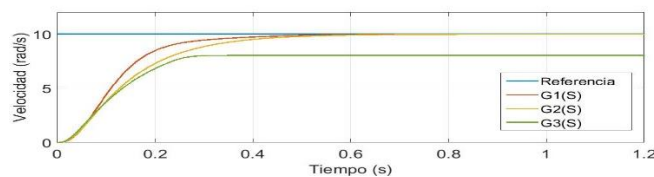
**Gráfico 2** Curvas de respuesta de las funciones de transferencias obtenidas a una entrada de pwm=50.

Del gráfico (2) se puede apreciar que las respuestas de las FT identificados del motor de CD tiene diferentes amplitudes con una misma entrada de PWM=50.

La respuesta más acertada en este caso es la función de transferencia que está parametrizada a esta entrada, cabe destacar que al salir de su zona de identificación la función de transferencia pierde su validez a su dinámica.

Debido a que se tiene distintas FT que describe parte la dinámica en varias zonas de operación de la máquina, un controlador PI clásico no será suficiente para controlar el sistema, es por ello que se propone un controlador PI difuso ganancias programables.

El gráfico (3) se muestra las curvas de respuesta en lazo cerrado de cada FT mediante un controlador PI clásico sintonizado con la herramienta (Tune PID) de matlab evitando la respuesta en sobreoscilación, aunque también puede ser sintonizado por cancelación de polos o método de Ziegler-Nichols, pero la finalidad es demostrar que las tres plantas identificadas no todos representa la dinámica real en ese punto de operación.



**Gráfico 3** Respuesta de las funciones de transferencias a lazo cerrado con controlador PI sintonizado con la herramienta Tune de Matlab.

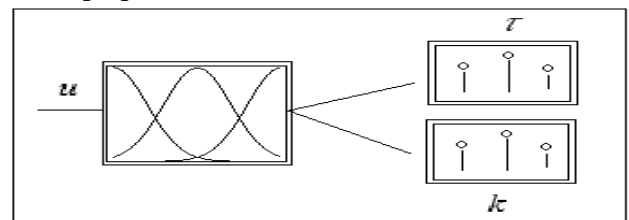
Del gráfico (3) se observa que 2 respuestas alcanzan a la referencia, mientras que uno se queda alrededor de 8 rad/s. la respuesta más acertada es la que fue identificado con una entrada de pwm 255 en este caso la ecuación (7).

El valor máximo permitido PWM es 255 y por lo tanto su máxima velocidad alcanzada a esta entrada es 8.035 rad/s, lo indica que no puede alcanzar la referencia con la entrada ( $u$ ) máxima y esto representa la dinámica real del motor, mientras que las 2 curvas que alcanzan la referencia no describe la dinámica real en este punto de operación.

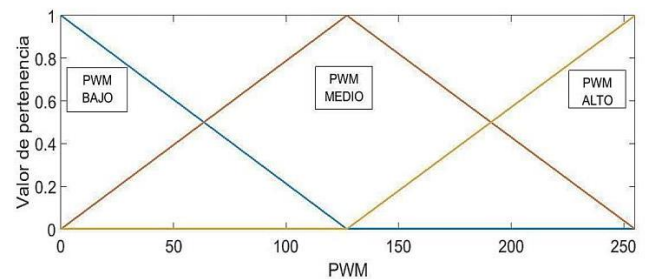
### Identificación de Modelo T-S

Para describir un mejor comportamiento del MCD se conjuntan las tres funciones de transferencia parametrizadas para encontrar las curvas de respuestas en relación con la entrada ( $u$ ) usando lógica difusa mediante las siguientes reglas:

- Si  $u$  es grande entonces  $g(s)$  de ( $u$ ) grande
- Si  $u$  es media entonces  $g(s)$  de ( $u$ ) media
- Si  $u$  es pequeño entonces  $g(s)$  de ( $u$ ) pequeño



**Figura 1** Esquema de inferencia difusa para  $k$  y  $\tau$  respecto a la entrada  $u$  que corresponde al valor PWM.



**Gráfico 4** Funciones de pertenencia para la entrada PWM.

La figura 1 muestra el esquema difuso de una variable de entrada y dos variables de salida, las ganancias  $k$  y  $\tau$ . Donde la variable de entrada PWM [0-255] y definido con tres funciones de pertenencia triangulares, con los valores lingüísticos bajo [0, 0,127], medio [0, 127, 255] y alto [127, 255, 255]. Cabe destacar que las funciones de transferencia identificadas a diferentes entradas son aproximadas a ecuaciones diferenciales ordinales de primer orden. La constante de tiempo  $\tau$  y la ganancia  $k$  son de tipo singleton con el valor de cada FT del sistema identificado respectivamente.

Mediante lógica difusa se aproximan las ganancias de  $k$  y  $\tau$ , de esta forma el sistema de inferencia difuso aproxima las dinámicas no capturada, es decir se realiza una interpolación acotada por las ganancias obtenidas en la etapa de identificación de esta manera se estiman las diferentes curvas de acuerdo a la entrada y no linealidades que presenta el MCD.

Se realizó la implementación de la función de transferencia de primer orden en Simulink mediante bloques, con entrada de coeficientes variables. Para simular el sistema en tiempo real se acopla el bloque de inferencia difusa como se desarrolló en la figura 1a.

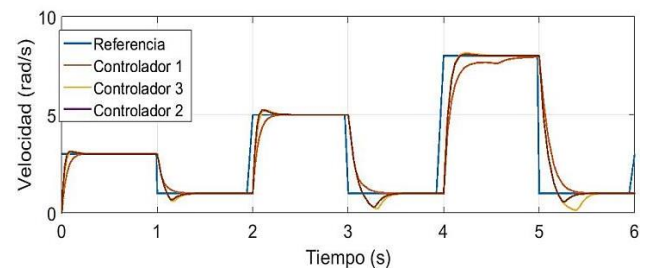
### Implementación de un Control PI difuso ganancias programables

A partir las 3 funciones de transferencia obtenidas del MCD mostradas en las ecuaciones (5), (6) y (7), se realizó la sintonización de un controlador PI para cada FT con base a criterio integral absoluto del error (IAE) basado en los parámetros de López (Ruíz, 2002) con la finalidad de evaluar el desempeño de cada controlador en cada planta, donde: ( $K_p$  y  $K_i$ ) son ganancias de controlador,  $T_d$  tiempo de establecimiento en segundos al 2%,  $M_p$  es el porcentaje de sobrepaso e IAE es la integral de error absoluto.

Función de transferencia parametrizada	$K_p$	$K_i$	$T_d$ al $\pm 2\%$	$M_p$ %	IAE
G1(S) y (controlador C1)	15.9	90.1	0.40 s	0%	0.042
G2(S) y (controlador C2)	30	583	0.42 s	0.55	0.039
G3(S) y (controlador C3)	50	819	0.31 s	1.31	0.031

**Tabla 1** Ganancias de los controladores PI implementados a cada función de transferencia y su respectiva respuesta con referencia de 1 rad/s.

La dinámica del motor DC implementado con lógica difusa a partir de funciones de transferencia es no lineal, ya que posee parámetros variables respecto a la entrada de excitación, con la finalidad de observar el comportamiento de los controladores PI ante éste sistema no lineal se realiza la simulación con varias entradas escalón con cada controlador sintonizado mostrado en la tabla 1.



**Gráfico 5** Respuesta de los controladores en el modelo T-S difuso del MCD.

Con base al criterio de desempeño (C.d.) de IAE y el tiempo de establecimiento se evalúan el comportamiento de cada controlador en el sistema no lineal para cada cambio de referencia.

Tiempos		(0-1)	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
C1	IAE	0.14	0.13	0.35	0.39	1.03	1.08
	$T_d$ (s) $\pm 2\%$	0.17	0.22	0.20	0.28	0.72	0.27
C2	IAE	0.069	0.09	0.20	0.44	0.54	0.95
	$T_d$ (s) $\pm 2\%$	0.185	0.29	0.22	0.42	0.16	0.3
C3	IAE	0.086	0.13	0.23	0.48	0.54	1.13
	$T_d$ (s) $\pm 2\%$	0.21	0.31	0.24	0.45	0.15	0.47

**Tabla 2** Evaluación de IAE y Tiempo de establecimiento para cada cambio de referencia con duración de 1 segundo.

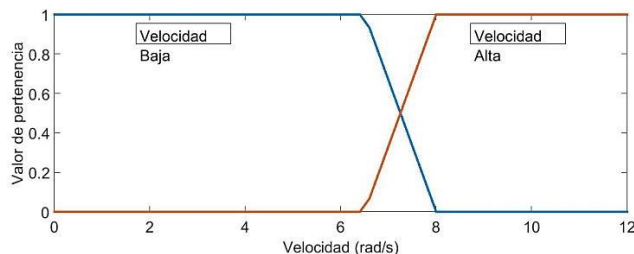
De la tabla 2 se observa que el controlador 2 ofrece buen desempeño según el criterio de IAE a referencias altas de velocidad, aunque presenta pequeños sobre impulsos a referencias bajas y en decrementos de velocidad, el controlador 1 no presenta sobre impulsos a referencias bajas pero demora a referencias grandes de velocidad.

Conociendo la dinámica del sistema se puede generar un controlador PI difuso con ganancias programables T-S con reglas del tipo *SI-ENTONCES*. A partir de los parámetros de los controladores que define localmente la dinámica del sistema combinando el mejor desempeño en criterio IAE y el mejor en tiempo de establecimiento usando las ganancias de los controladores PI 1 y 3.

La estimación de las ganancias  $K_p$  y  $K_i$  de los controladores para cada FT se obtiene a partir de la velocidad del MCD. Entonces se plantea las siguientes reglas:

- Si la velocidad es baja entonces  $K_p$  y  $K_i$  baja.
- Si la velocidad es alta entonces  $K_p$  y  $K_i$  alta.

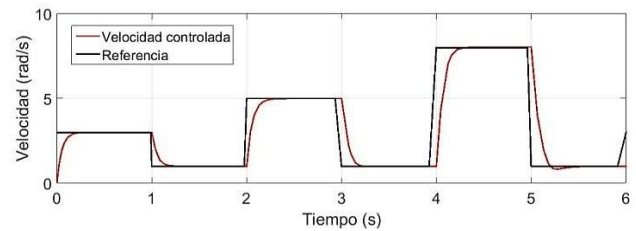
Las funciones de pertenencia para la variable de entrada referencia de velocidad dado en rad/s acotadas de [0-12], con los valores lingüísticos referencia baja [0, 0, 6.2, 8] y referencia alta [6.2, 8, 12, 12] son de tipo trapezoidal debido a su simplicidad y aproximación. Los rangos definidos en el gráfico 6 tomando a consideración las mejores respuestas de los controladores con los criterios de IAE mostrados en la tabla 2 de esta manera obtener un menor sobre impulso y un mejor tiempo de establecimiento.



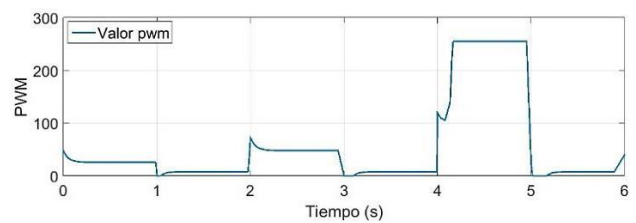
**Gráfico 6** Funciones de pertenencia de la variable de entrada velocidad.

Las variables de salida ( $K_p$  y  $K_i$ ) son de tipo singleton con valores de los controladores C1 y C3.

Con el modelo de la dinámica no lineal del MCD y el controlador PI difuso con ganancias programables fueron acoplados en lazo cerrado y simulados para corroborar su desempeño respecto a los controladores PI clásicos. Tomando en cuenta la misma secuencia de entradas de referencia usado en el Gráfico 6 se obtiene la siguientes gráficas.



**Gráfico 7** Respuesta del controlador PI difuso en el sistema no lineal.



**Gráfico 8** Valor de PWM del controlador difuso obtenido en simulación.

Tiempos	(0-1)	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
C.d. IAE	0.14	0.10	0.22	0.22	0.30	0.25
Td (s) ±2%	0.19	0.22	0.20	0.19	0.23	0.20

**Tabla 3** Evaluación de IAE y Tiempo de establecimiento para el controlador difuso con escalones de referencia.

### Resultados

Con el controlador PI difuso ganancias programables se observa que el tiempo de establecimiento al 2% a referencias bajas es de 0.19 s, que es menor en relación al tiempo de establecimiento del controlador 3 que fue de 0.21 s, pero es mayor comparando con el controlador 1 con un tiempo de establecimiento al 2% de 0.17 s y con base al criterio IAE los valores obtenidos en el controlador difuso en referencias bajas es de 0.14 s con el mismo valor obtenido al controlador 1.

Para referencias de velocidades medio el tiempo de establecimiento para el controlador difuso de ganancias programables es de 0.2 s, igual que el controlador 1 que es el tiempo más rápido en relación a los tres controladores PI.

Para referencias de velocidades altas en el controlador difuso mejora en relación a los tres controladores PI obteniendo un menor tiempo de establecimiento de 0.2 s y un mejor desempeño con índice de 0.25 de IAE.

El modelo no lineal obtenido mediante la combinación de varias funciones de transferencia determina la velocidad máxima que alcanza en el sistema real.

### Conclusión

En el presente trabajo se muestra que si es posible generar un modelo difuso que aproxime un rango amplio de la dinámica del MCD mediante varios experimentos de identificación, usando algún método de aproximaciones de respuesta como la de Strejc de esta manera obtener varias funciones de transferencia que describa su dinámica en cierta región bajo cierta entrada excitación.

A partir del modelo difuso de MCD se puede obtener parámetros relevantes como son las ganancias de controladores PI o PID para generar un controlador difuso de ganancias programables y de esta manera realizar simulaciones más acertadas al comportamiento real del sistema considerando las no linealidades que presenta la máquina. El controlador PI difuso de ganancias programables obtuvo un buen desempeño en el control de regulación de velocidad, en comparación de los controladores PI obtenidos de cada función de transferencia, combinando un menor tiempo de establecimiento y reduciendo el índice de IAE.

Esta metodología puede ser empleada en sistemas que tienen las respuestas similares a un sistema de primer orden y que presente no linealidades, comúnmente en la respuesta de velocidad para diferentes MCD.

### Agradecimientos

Juan David Padre Ñonthe agradece a CONACYT por la beca otorgada de maestría con CVU: 713501.

### Referencias

- Aguado, A., & Cipriano, A. (2009). Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 6(1), 20–30. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70073-1](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70073-1)
- Bueno, A. M. (2011). Identificación experimental de sistemas.
- Emhemed, A. A. A., & Bin Mamat, R. (2012). Modelling and simulation for Industrial DC Motor using Intelligent control. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 420–425. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.193>
- Fidel, L., Natale, C., Mercado, E. C., Cesar, J., Fernández, R., Antonio, M., ... Ac, C. (2017). Comparación experimental de controladores PID clásico, PID no lineal y PID difuso para el caso de regulación. *9o Congreso Mexicano de Inteligencia Artificial COMIA 2017*, 9, 1–14.
- Mora, L. A., & Amaya, J. E. (2017). Un Nuevo Método de Identificación Basado en la Respuesta Escalón en Lazo Abierto de Sistemas Sobre-amortiguados. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, 14(1), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.09.006>



Petru, L., & Mazen, G. (2015). PWM control of a DC motor used to drive a conveyor belt. *Procedia Engineering*, 100(January), 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.371>

Rairán-Antolines, J. D., Guerrero-Cifuentes, C. E., & Mateus-Pineda, J. A. (2010). Diseño de controladores de tipo proporcional integral derivativo (PID) y difuso para la posición de un motor de corriente continua (DC). *Ingeniería Y Universidad*, 14(1), 137–160.

Ruíz, V. M. A. (2002). CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES, 12(2), 21–36.

Sebastian, M., & Alvarado, A. (2012). Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado : Control de velocidad por corriente de armadura. *Instituto de Ciencias Físicas, Escuela Superior Politécnica Del Litoral*, 6(1), 154–161.

Tanda-Martinez, R. F. (2011). Evaluación del desempeño de métodos experimentales de identificación a lazo abierto. *Revista de Ingeniería*, 32, 50–64. Retrieved from [http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/riec/article/view/82/pdf\\_76](http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/riec/article/view/82/pdf_76)

Tanda, R. F., & Aguado, A. (2013). Identificación de sistemas en lazo cerrado basada en una estrategia híbrida AGA-simplex. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, 10(1), 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.11.004>

Zaki, A., El-Bardini, M., Soliman, F., & Sharaf, M. (2015). Embedded Two Level Direct Adaptive Fuzzy Controller for DC Motor Speed Control. *Ain Shams Engineering Journal*, 1–11.