

Controlador difuso tipo-2 para el control de velocidad de un motor de CD sujeto a un disturbio grande

Emilio R. Moo Medina, David Romero Romero

Instituto Politécnico Nacional, SEPI-EZIME Zacatenco,
México

ermm22@hotmail.com, dromero@ipn.mx

Resumen. Se presenta la metodología para la aplicación de un controlador difuso tipo-2 en intervalos para el control de velocidad de un motor de corriente directa ante un gran disturbio estocástico y otro determinista. Se propone la arquitectura del control tipo-2 con el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel (EKM por sus siglas en inglés). El cuál es más eficiente que su predecesor Karnik & Mendel (KM) en tiempo de ejecución. El modelo utilizado para las simulaciones es el modelo no lineal de un motor de corriente directa de 5 HP, incluyendo el limitador del voltaje de armadura. El disturbio grande indica para este caso un incremento del 100 % en el par externo de carga. Es decir, una fuerza externa que tiende a frenar al motor. Este trabajo es continuación del presentado en [11]. En donde se estudió un control difuso tipo-2 con el algoritmo de Karnik & Mendel (KM) convencional para el control de velocidad de un motor de CD sujeto únicamente ante pequeños disturbios en el par de carga y velocidad de referencia. La sintonización del controlador tipo-2 se obtiene a partir de un control tipo-1 sintonizado. Se compara el desempeño de ambos controladores difusos tipo-1 y 2. La medición del desempeño se realiza mediante la cuantificación del error a partir de índices de desempeño ISE, IAE e ITAE. Los resultados muestran la ventaja del controlador tipo-2 ante disturbios grandes con y sin carga estocástica. Esto se debe a un mejor manejo de las incertidumbres y al comportamiento no lineal del controlador tipo-2. La robustez en los resultados de ambos controladores difusos, permite mantener la estabilidad, incluso cuando son expuestos en situaciones de no linealidad por disturbios grandes deterministas y estocásticos.

Palabras clave. Controlador difuso tipo-2 en intervalos, controlador difuso tipo-1, algoritmo de Karnik & Mendel mejorado.

Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance

Abstract. In this paper the methodology of an application of a type-2 fuzzy logic controller for the speed control of a direct current machine subject to a stochastic and deterministic large signal is presented. A type-2 PI fuzzy logic controller using the Enhanced Karnick-Mendel algorithm (EKM) is proposed. This has a better runtime on the conventional Karnick-Mendel algorithm (KM). The nonlinear model of a 5 HP separately excited DC Motor including an armature voltage limiter is used. A 100% increment in the load torque is applied. This is a braking torque. This paper is a continuation of the research presented in [11]. Where, a type-2 PI fuzzy logic controller using a KM for the speed control of DC motor subject to a small disturbance in load and speed reference is analyzed. The type-2 PI controller is tuned based on a type-1 PI controller. The performance of both controllers is compared. The quantitative performance of both controllers is measured in terms of integral square error (ISE), integral absolute error (IAE) and integral time absolute error (ITAE). Tests show the advantage of the type-2 PI fuzzy controller when the motor load is subject to a stochastic and deterministic large disturbance. This is explained by the better handling of uncertainty and nonlinear behavior of type-2 PI. The robustness, in the results of both fuzzy controllers, presents stability in nonlinear sceneries when exposed to stochastic and deterministic large signals.

Keywords. Interval type-2 fuzzy logic controller, Type-1 fuzzy logic controller, enhanced Karnick-Mendel algorithm.

1. Introducción

Una nueva clase de conjuntos lógicos difusos de mayor orden denominados tipo-2, fueron introducidos por Zadeh en 1975 como una extensión de los conjuntos difusos ordinarios [1, 2] (tipo-1). Tales conjuntos pueden manejar las incertidumbres presentes en los sistemas debido a que sus grados de pertenencia son así mismos conjuntos difusos tipo-1.

Una justificación para el uso de conjuntos difusos de tipo-2 es la incertidumbre que puede existir en los sistemas en los que se aplican conjuntos difusos tipo-1. Esta incertidumbre puede presentarse en distintas formas [3]: reglas con diferente significado para diferentes expertos; consecuentes que difieren para reglas idénticas según diferentes expertos; ruido presente en los en los transductores de medición de las variables físicas o en la naturaleza misma de las variables involucradas y diferencias entre el modelo matemático y el sistema real. Así, se puede pensar en los conjuntos difusos tipo-1, como conjuntos difusos con aproximación de primer orden para la representación de la incertidumbre. Siendo de esta forma, los conjuntos difusos tipo-2 una aproximación de segundo orden de la incertidumbre presente en situaciones del mundo real [4].

Por otra parte, actualmente las máquinas de corriente directa (CD), no son ampliamente utilizadas como años atrás. Los generadores de CD han sido reemplazados en la actualidad por elementos de estado sólido. Sin embargo, aun los motores de CD aunque a bajas potencias [12,13], son utilizables en áreas de la electrónica industrial (para control de velocidad y posicionamiento), robótica, automotriz, aplicaciones en grúas, elevadores e industria en general. Esto debido a sus características de torque-velocidad, presentes en las diversas configuraciones del motor CD [14].

Para el control de los motores de CD, los controladores lógicos difusos tipo-1 han mostrado ser superiores en varios aspectos a los tradicionales controladores P, PI, PID. Entre ellos se puede mencionar menor sobretiro, robustez, estabilidad, entre otros. [10, 15, 16, 17, 19, 20, 27] Por esta razón los controladores convencionales no son considerados en este trabajo, que se

concentra en el estudio comparativo ante grandes disturbios deterministas y estocásticos, entre controladores difusos tipo-1 y tipo-2 como en [11, 18, 22, 24, 25]. No obstante los controladores convencionales PID pueden trabajar en conjunto con los controladores difusos, y aprovechar su sistema de inferencia mediante el razonamiento aproximado para su propia sintonización [20, 21].

La implementación de los sistemas difusos tipo-1 se ha realizado satisfactoriamente en dispositivos lógicos programables [29]. Incluso algunas metodologías basadas en amplificadores operacionales han sido presentadas para la implementación de los procesos de defusificación y dedefusificación de sistemas difusos tipo-1 [28].

Por su parte, la implementación de los controladores difusos tipo-2 requiere de grandes recursos computacionales [25]. Las diferentes alternativas para su implementación en computadoras personales, así como en dispositivos programables es un tópico actual de investigación [25,30,31,32], que merecen investigaciones de mayor tamaño y atención científica y computacional.

Los resultados en este trabajo se presentan a nivel simulación como en [11, 18, 22, 24, 25, 26]. Cabe mencionar que las pruebas de simulación permiten probar controladores en etapa experimental y predecir comportamientos, lo que ayuda al estudio de factibilidad del método propuesto.

En lo que respecta a controladores tipo-2 frente a controladores difusos tipo-1, se han mostrado resultados satisfactorios en [11, 18, 22, 24, 25]. En [18] se analiza un controlador difuso tipo-2 en intervalos frente a un control difuso tipo-1 para un pequeño servomotor de baja potencia, ante un escalón unitario. Pequeños cambios de carga con y sin incertidumbre, utilizando software comercial.

En [22], se estudia un controlador difuso PI tipo-2 frente a un control difuso tipo-1. El autor propone funciones de membresía tipo diamante para sus universos de entrada. Los controladores se aplican únicamente a un sistema de primer orden. Se muestran pruebas ante cambios tipo escalón, obteniendo resultados contundentes cuando la incertidumbre en dichos conjuntos difusos aumenta.

Por su parte los trabajos [24, 25] son similares al presente.

Aunque en estos se controla la velocidad de un motor DC y se analizan los controladores tipo-1 y 2 ante pequeños disturbios y señales escalón. Los pequeños disturbios se modelan como cambios pequeños en la referencia de velocidad o carga mecánica en el eje del motor. En este trabajo se estudia el controlador difuso tipo-2 sujeto a disturbios grandes. Lo cual permite llevar al controlador a situaciones de no linealidad, extremas no convencionales y zonas de posible inestabilidad, para evaluar el comportamiento. Además, también se añade ruido a la señal de carga mecánica aplicada al eje del motor.

Se utilizan controles difusos para el control de motores de CD, ya que se presentan incertidumbres en los parámetros del motor debidas a variaciones naturales y no linealidades; así como ruidos en las señales de alimentación y medición; además los grandes disturbios excitan situaciones no lineales y posiblemente inestables. Especialmente los controles difusos tipo-2 modelan la incertidumbre como una aproximación de segundo orden [4] y con mayor eficiencia computacional.

Este trabajo es continuación de un trabajo previo [11]. En el cual se analizan los controladores difusos tipo-1 y tipo-2 para la regulación de velocidad de un motor CD con excitación separada utilizando el algoritmo convencional de Karnik & Mendel y se analizan casos a pequeños disturbios.

La aportación de este artículo consiste en exponer el control difuso en intervalos tipo-2 ante grandes disturbios con y sin carga estocástica. La carga estocástica se modela como cambios continuos del valor de carga alrededor de una media. Por lo que se tiene una señal de disturbio grande con ruido. Esto permite exponer al controlador ante situaciones de no linealidad, situaciones extremas no convencionales y posible inestabilidad. Ya que cuando un sistema se somete a un disturbio grande, su respuesta es no lineal, a diferencia de los problemas con señales de pequeños disturbios, donde la respuesta es lineal [18, 22, 24, 25].

Se propone la arquitectura del control tipo-2 con el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel (EKM por sus siglas en inglés), ante grandes disturbios. Se realiza la comparación entre ambos algoritmo Karnik & Mendel y Karnik & Mendel

mejorado. Siendo este último más eficiente en tiempo de ejecución, en base a los resultados que se muestran en el apéndice 4.2. Los algoritmos de control se desarrollaron en lenguaje Matlab. Esto motiva a futuros trabajos de implementación en dispositivos programables.

El modelo utilizado para las simulaciones es el modelo no lineal de un motor de corriente directa de 5 HP, incluyendo el limitador del voltaje de armadura. El disturbio grande es un incremento del 100 % en el par de carga. Es decir, una fuerza externa que tiende a frenar al motor.

La sintonización del controlador tipo-2 se realiza a partir de un control tipo-1 sintonizado. Ambos controladores mantienen el mismo dominio en sus universos difusos de entrada y las mismas reglas difusas. La medición del desempeño se realiza mediante la cuantificación del error a partir de índices de desempeño ISE, IAE e ITAE. Los resultados muestran la ventaja del controlador tipo-2 ante disturbios grandes con y sin carga estocástica. Esto se debe a un mejor manejo de las incertidumbres, por parte de los conjuntos difusos tipo-2 y al comportamiento no lineal del controlador tipo-2. Finalmente estos resultados permiten concluir la robustez de los controladores difusos que son capaces de mantener la estabilidad, incluso cuando son expuestos en situaciones de no linealidad por disturbios grandes deterministas y estocásticos.

2. Arquitectura de un controlador lógico difuso tipo-2

Un controlador lógico difuso que utilice al menos un conjunto difuso caracterizado por una función de membresía tipo-2, es llamado controlador lógico difuso general tipo 2 [5]. Este último se representa mediante \tilde{A} y en su función de membresía intervienen tres dimensiones de la forma $(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u))$, en donde $x \in X, u \in J_x$, y $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. x es la variable de entrada mapeada. En este caso $X = [e \Delta e]$ (definido en (5)), es un vector de dos dimensiones que incluye el error de la velocidad del motor y el cambio del error, ambas en rpm. u es el grado de membresía primario, mientras que $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ se conoce como grado de membresía secundario [6]. Así estos conjuntos son más complejos debido a la nueva

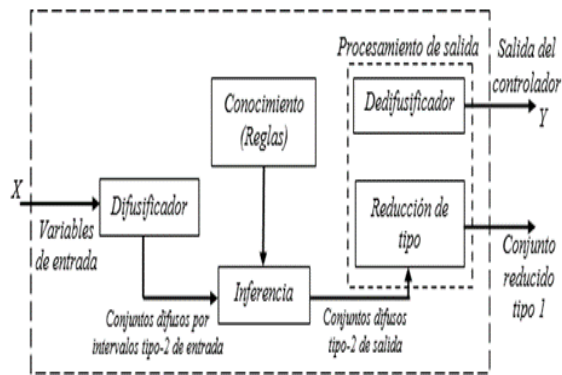


Fig. 1. Elementos del controlador difuso tipo-2 en intervalos

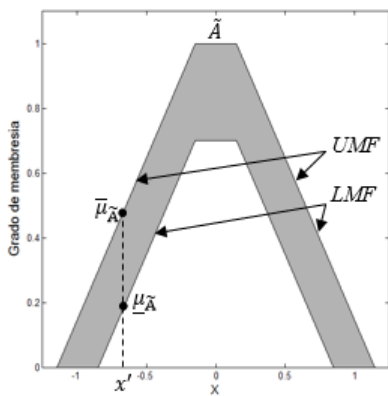


Fig. 2. Conjunto difuso tipo-2 en intervalos

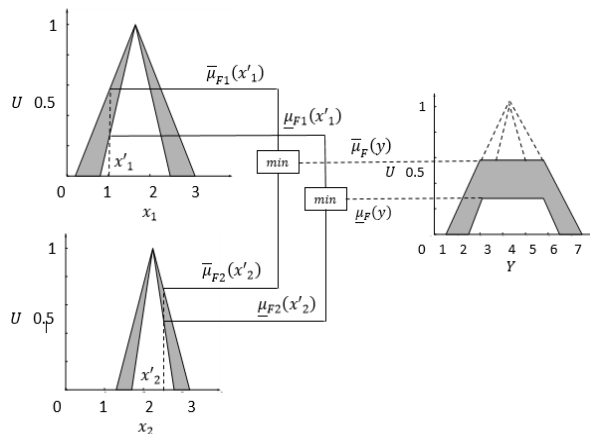


Fig. 3. Sistema de inferencia para una regla con consecuentes y antecedentes intervalo tipo 2

dimensión en sus grados de pertenencia asociados.

Con lo que se tienen sistemas de inferencia y procesos de reducción complejos y tardados.

Cuando todos los valores de los grados de membresía secundarios son unitarios, el conjunto difuso tipo-2 se reduce a un caso especial denominado, conjunto difuso tipo-2 en intervalos [7]. De esta forma se tiene un controlador intervalo difuso tipo-2. La estructura del controlador es mostrada en la figura 1 [23].

Los controladores utilizados son denominados PI tipo-1 y PI tipo-2. La salida $Y (\Delta v_a)$, en ambos controladores es el incremento del voltaje de armadura (ver (6)) y es de tipo incremental. Es decir, el incremento positivo o negativo de su variable de salida, dependerá de sus valores actuales.

2.1. Conjuntos difusos tipo-2 en intervalos

Un conjunto difuso general tipo-2, denotado por \tilde{A} , se caracteriza por una función de membresía de 2do tipo $MF \mu_{\tilde{A}}(x, u)$, donde $x \in X$ y $u \in J_x \subseteq [1,0]$, es decir:

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [1,0]\}, \quad (1)$$

donde $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. Es posible expresar \tilde{A} como:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) J_x \subseteq [1,0]. \quad (2)$$

La primera restricción $\forall u \in J_x \subseteq [1,0]$, es consistente con la restricción de un conjunto difuso $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. Es decir cuando desaparece la incertidumbre, una función de membresía tipo-2, se reduce a una función de membresía tipo-1. La segunda restricción $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$, se basa en que una función de membresía deben tomar valores entre 0 y 1 [6]. Cuando todas las $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ entonces el conjunto \tilde{A} es llamado conjunto difuso tipo-2 en intervalos [8] (por sus siglas en inglés *IT2 FS*). Entonces la dimensión extra en los conjuntos difusos ya no es necesaria, debido a que ya no proporciona información extra. Un *IT2 FS* es un caso especial de un conjunto general difuso tipo-2 y puede ser expresado como:

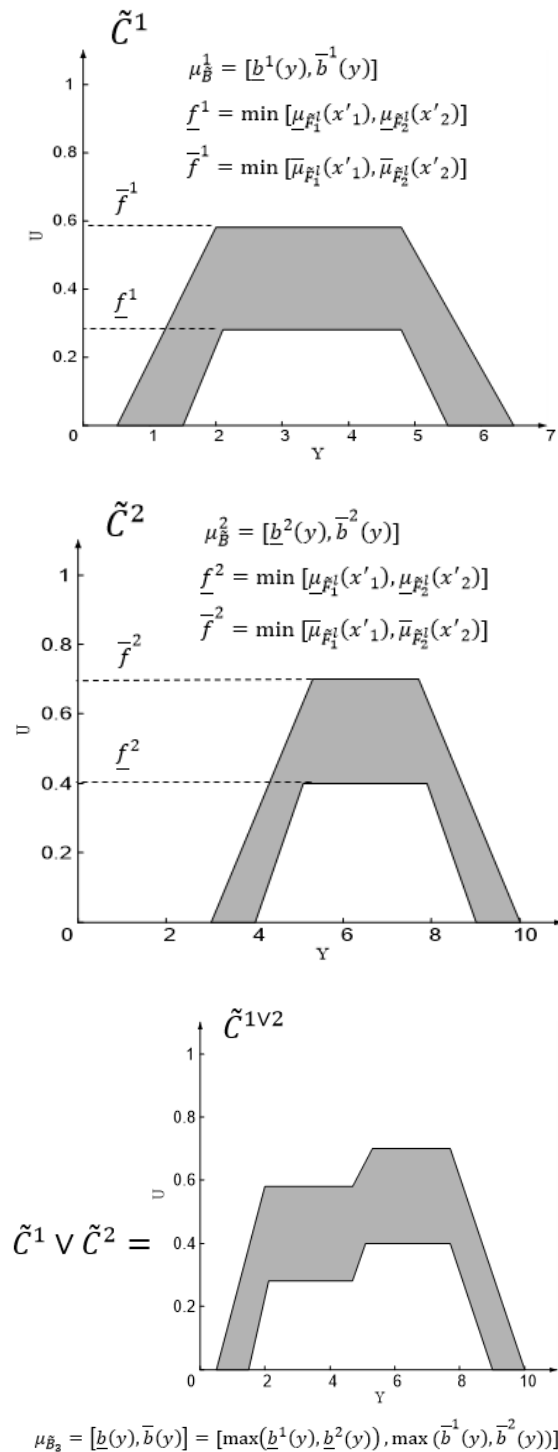


Fig. 4. Sistema de inferencia para dos reglas difusas, con conjuntos consecuentes tipo-2, v indica máximo

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u) J_x \subseteq [1,0]. \quad (3)$$

El área entre el límite superior el cual es llamado UMF (del inglés upper membership function) y el límite inferior denominado LMF (del inglés lower membership function), se denomina huella de incertidumbre [6].

Para el proceso de defusificación se tendrá un conjunto valores de membresía primarios. Debido a que el algoritmo de reducción de tipo trabaja únicamente con los valores en los límites superior e inferior, entonces para cada valor $x = x'$, se tendrá $[\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x'), \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x')]$. En donde $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x')$ y $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x')$ indican los grados de membresía en u , en los límites inferior y superior respectivamente.

En otras palabras, es el dominio de una función de membresía secundaria.

2.2. Sistema de inferencia para un sistema difuso tipo-2 en intervalos

Considerando un sistema lógico difuso con p entradas $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_p \in X_p$, y una sola salida. El cual utiliza reglas difusas de tipo SI-ENTONCES, las cuales son de la forma siguiente:

$$R^l: \text{Si } x_1 \text{ es } \tilde{A}_1^l \text{ "y" } x_2 \text{ es } \tilde{A}_2^l \text{ "y" } \dots \dots \text{"y" } x_p \text{ es } \tilde{A}_p^l \text{ entonces } y \text{ es } \tilde{C}^l. \quad (4)$$

Esta estructura de regla representa una relación difusa tipo-2, entre el espacio de las variables de entrada y la variable de salida. En donde \tilde{A}_1^l , expresa un conjunto difuso tipo-2, en el universo de discurso de la variable x_1 . El subíndice l hace referencia a la l -ésima regla difusa.

Mientras que \tilde{C}^l se refiere al conjunto de salida difuso tipo-2 para la l -ésima regla. Es decir, es la parte consecuente de una regla difusa. Para nuestro caso en particular \tilde{C}^l serán los centros de membresía de los conjuntos difusos en el universo de salida del controlador, figura 8.

La estructura de las reglas tiene la misma forma que las reglas en un sistema lógico difuso tradicional. Con la particularidad de que se utilizan conjuntos difusos tipo-2.

El análisis en forma gráfica del sistema de inferencia para una sola regla difusa se muestra

Tabla 1. Algoritmo Mejorado de Karnik & Mendel para el cálculo de y_l .

Cálculo de y_l
1.-Hacer discreto cada conjunto de salida en N puntos x_i es decir $\{x_1, \dots, x_N\}$. Tal que $x_1 < x_2 < \dots < x_N$
2.- Hacer $k = N/2.4$ (redondear al entero más cercano).
3.- Calcular $a = \sum_{i=1}^k x_i \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
4.- Calcular $b = \sum_{i=1}^k \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
5.-Hallar k' tal que $x_{k'} \leq a/b < x_{k'+1}$
6.- Mientras $k' \neq k$ hacer:
7.- Hacer $s = \text{signo}(k' - k)$
8.- Actualiza
$a \leftarrow a + s \sum_{i=\min\{k, k'\}+1}^{\max\{k, k'\}} x_i (\underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) - \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i))$
9.- Actualiza
$b \leftarrow b + s \sum_{i=\min\{k, k'\}+1}^{\max\{k, k'\}} \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) - \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
10.- Actualiza $k \leftarrow k'$
11.- Hallar k' tal que $x_{k'} \leq a/b < x_{k'+1}$
12.- Retorna $y_l = a/b$; y $L = k$

Tabla 2. Algoritmo Mejorado de Karnik & Mendel para el cálculo de y_r .

Cálculo de y_r
1.- Hacer discreto cada conjunto de salida en N puntos x_i es decir $\{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N\}$. Tal que $\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \dots < \bar{x}_N$
2.- Hacer $k = N/1.7$ (redondear al entero más cercano).
3.- Calcular $a = \sum_{i=1}^k \bar{x}_i \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \bar{x}_i \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
4.- Calcular $a = \sum_{i=1}^k \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
5.-Hallar k' tal que $x_{k'} \leq a/b < x_{k'+1}$
6.- Mientras $k' \neq k$ hacer:
7.- Hacer $s = \text{signo}(k' - k)$
8.- Actualiza
$a \leftarrow a - s \sum_{i=\min\{k, k'\}+1}^{\max\{k, k'\}} \bar{x}_i (\underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) - \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i))$
9.- Actualiza
$b \leftarrow b - s \sum_{i=\min\{k, k'\}+1}^{\max\{k, k'\}} \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) - \underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i)$
10.- Actualiza $k \leftarrow k'$
11.- Hallar k' tal que $x_{k'} \leq a/b < x_{k'+1}$
12.- Retorna $y_r = a/b$; y $R = k$

en las tablas 1 y 2, donde el grado de membresía inferior LMF y superior UMF del conjunto de salida $\tilde{C}^{1 \vee 2}$, resultado de la unión de \tilde{C}^1 y \tilde{C}^2 . Además LMF y UMF del conjunto difuso tipo-2 en intervalos de salida, son determinados mediante el operador

máximo [7]. Para el caso de activación de dos reglas difusas se presenta la Tabla 2.

2.3. Algoritmo Reducción de Tipo para un Controlador Difuso tipo-2 en intervalos

El algoritmo mejorado de Karnik & Mendel fue propuesto por sus autores Karnik y Mendel [9] para reducir en alguna manera el costo computacional del primer algoritmo KM propuesto por ellos mismos [7, 23]. En forma similar, EKM consiste básicamente en hallar los puntos de conmutación y_l y y_r . En forma general: primero, se reduce el número de iteraciones al realizar una mejor inicialización con respecto a KM; segundo, la condición de paro del algoritmo se cambia, para reducir iteraciones innecesarias.

Karnik y Mendel, se percataron de que la inicialización de $\theta_i = [\underline{\mu}_{\bar{B}}(x_i) + \bar{\mu}_{\bar{B}}(x_i)]/2$, en el original KM requería una mejor inicialización, para hallar L y R . Por lo que en base a extensas simulaciones hallaron, que el algoritmo presentaba mejor desempeño al hacer $N/2.4$ para y_l , $N/1.7$ para y_r . El proceso del algoritmo es el siguiente:

El valor numérico final es obtenido del promedio de y_l y y_r . Este es el valor de salida del controlador difuso tipo-2. Debido a que el control es del tipo incremental o PI [11]. Entonces realmente el resultado obtenido del algoritmo mejorado de Karnik & Mendel indica la cantidad a sumar a la salida en la iteración anterior. Nótese que dadas las barras de salida en la figura 8; el controlador proporciona la cantidad a incrementar o decrementar el voltaje de armadura, según sea el caso

2.4. Aplicación del control difuso al modelo del motor de CD

Para las pruebas se utiliza el modelo no lineal de un motor de corriente directa de 5 HP, incluyendo el limitador del voltaje de armadura con tolerancia del 10% sobre el voltaje nominal de armadura. El controlador difuso tipo-1 y 2 se aplica como se muestra en la figura 5.

T1 FLC (*type 1 Fuzzy Logic Controller*) es un control difuso tipo-1. IT2 FLC (*Interval type-2*

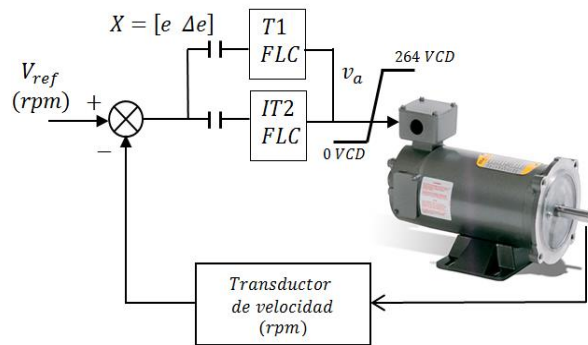


Fig. 5. Esquema de la aplicación de los controladores difusos tipo-1 y 2 sobre el control de velocidad del motor de CD

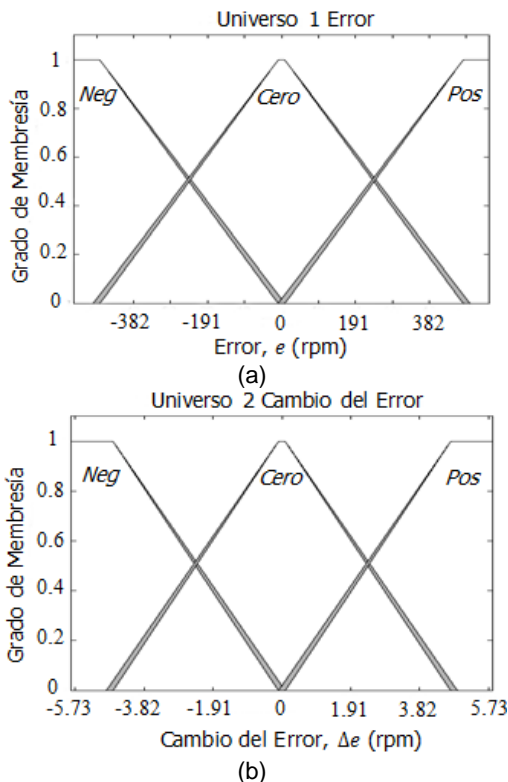


Fig. 6. Universos de entrada del controlador tipo 2: (a) error, (b) cambio del error

Fuzzy Logic Controller) es un controlador difuso tipo-2.

El vector X es un vector de dos dimensiones de las variables de entrada $X = [e \ \Delta e]$, donde:

$$e = \text{error} = V_{ref} - V_{real}, \quad (5)$$

$$\Delta e = \text{cambio del error} = e(k) - e(k-1).$$

La señal de error es la diferencia entre la velocidad de referencia V_{ref} y la velocidad actual del motor de CD en rpm.

El cambio del error es la diferencia entre el error actual y el error en el paso anterior.

La salida de ambos controladores difusos es el incremento o decremento del voltaje de armadura es decir Δv_a . Entonces, el control de velocidad se realiza usando el voltaje de armadura, por lo que:

$$Y(k) = \Delta v_a(k), \quad (6)$$

$$v_a(k) = \Delta v_a(k) + v_a(k-1),$$

donde (k) es el valor actual y $(k-1)$, es el valor en la iteración anterior, v_a es el voltaje de armadura y Δv_a es el incremento de dicho voltaje de armadura. La figura 8 muestra que $\Delta v_a(k)$, puede tomar valores positivos o negativos. A partir de esto es posible incrementar o disminuir v_a . Un limitador de voltaje de armadura en el motor de CD mantiene v_a dentro de sus valores de operación.

El modelo matemático del motor de CD es presentado en la sección 4.1.

El conocimiento dado al control difuso se tiene en las reglas difusas. Estas reglas idénticas para el control difuso tipo-1 y 2. Estas reglas son propuestas en forma heurística en base al conocimiento de un experto sobre el control de velocidad del motor de CD. A manera de ejemplo:

Si el error es negativo (Neg) y el cambio del error es negativo (Neg), la salida será negativa grande (NG).

Según (5), un error negativo indica que la velocidad real se encuentra por encima de la velocidad de referencia. Por su parte un cambio del error negativo indica que el error en el paso anterior es mayor que el error actual. Es decir el error va decreciendo. Por lo que se propone que el consecuente de la regla difusa sea negativa grande.

Desde que se debe disminuir la salida del voltaje de armadura para así lograr bajar la velocidad del motor. Estas reglas difusas no expresan en sí un valor numérico si no un conjunto difuso posible para el valor de salida para el voltaje

de armadura. La figura 6, permite ver los intervalos de los conjuntos difusos tipo-2, para los que se ha considerado un error y cambio del error en velocidad negativo, cero y positivo. La figura 7, muestra los intervalos de los conjuntos difusos tipo-1. A manera de ejemplo en la figura 6, un error negativo es considerado en el intervalo $[0 -\infty)$ rpm.

Notar que, para este conjunto negativo, los valores de membresía $[0 1]$, se encuentran para valores $[0 -50)$ rpm y que si las rpm están entre $[-50 -\infty)$ entonces el grado de membresía de error negativo es 1. El mismo análisis sigue a los conjuntos cero y positivo. Además el conjunto positivo existe para errores en la velocidad entre $[-50 50]$. Con un error de la velocidad de -20 rpm, el sistema de inferencia concluye que el error de la velocidad se encuentra con ciertas membresías en negativo (un conjunto de grados de verdad, debido a que son conjuntos difusos tipo-2 en intervalos) y con otras en positivo. El uso de estos términos lingüísticos como variables es la ventaja del uso de los sistemas difusos.

Para facilitar el proceso de defusificación se han considerado membresías de barra para las reglas consecuentes. Es decir, se consideran conjuntos simétricos y se toma solo el centro del conjunto difuso, figura 8. De esta forma es posible notar que los incrementos posibles para el voltaje de armadura en cada proceso de inferencia de ambos controladores difuso 1 y 2 se encuentra en el intervalo $[-30 30]$.

EL total de reglas difusas y sus consecuentes puede observarse en la tabla 3.

El proceso que realiza el controlador difuso tipo-2 en base a la figura 1 es:

Defusificar el vector de entrada $X = [e \ \Delta e]$ en 2.

3. Pruebas y resultados

Las pruebas fueron realizadas considerando el motor de corriente directa operando a valores nominales de placa en lo que respecta a velocidad, potencia, voltaje, corriente de armadura, corriente de campo, y par mecánico de carga según [10]. Los valores nominales son: 5 HP, voltaje de campo 240 VCD, corriente de campo 1 A, voltaje de armadura 240 VCD, corriente de armadura 39.58

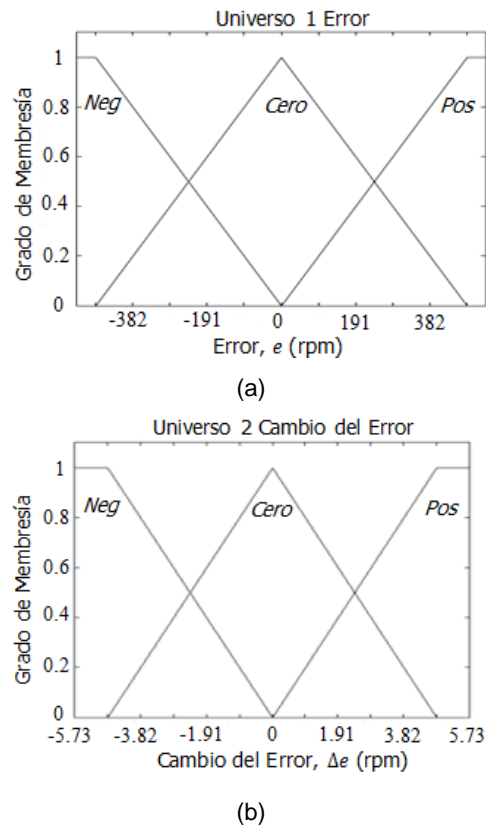


Fig. 7. Universos de entrada del controlador tipo 1: (a) error, (b) cambio del error

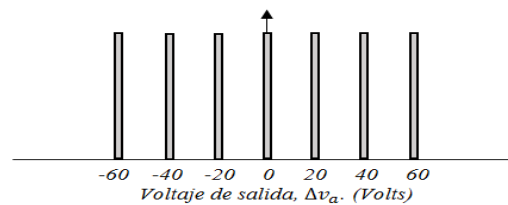


Fig. 8. Barras de salida para ambos controladores

Tabla 3. Tabla de conocimiento difuso para ambos controladores

Δe e	Neg	Cero	Pos
Neg	NG (-30)	NM(-20)	CE (0)
Cero	NP (-10)	CE (0)	PP (10)
Pos	CE (0)	PM (20)	PG (30)

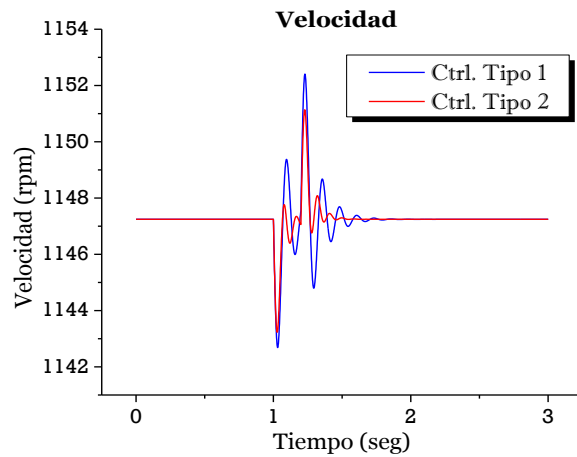


Fig. 9. Comportamiento de la velocidad, sin ruido en el par externo de carga

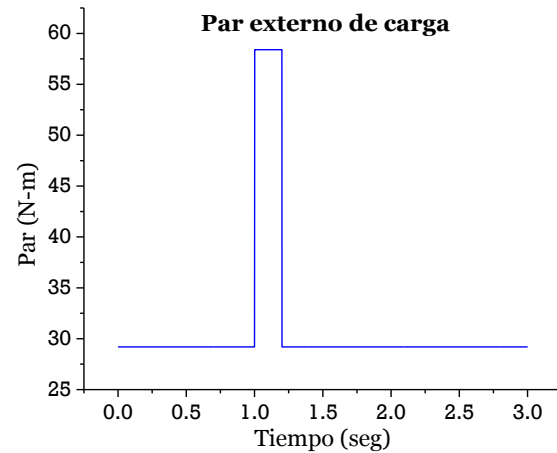


Fig. 10. Disturbio en la carga sin ruido

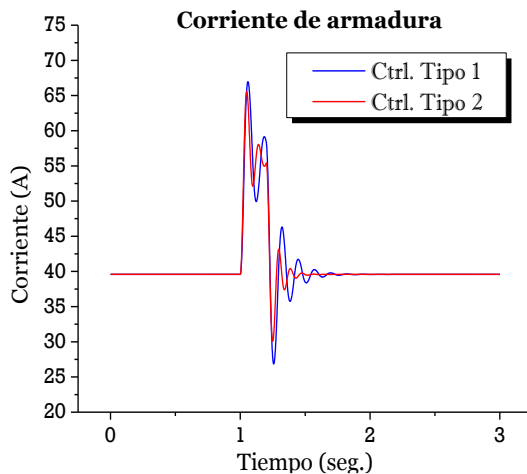


Fig. 11. Comportamiento de la corriente de armadura, sin ruido en el par externo de carga

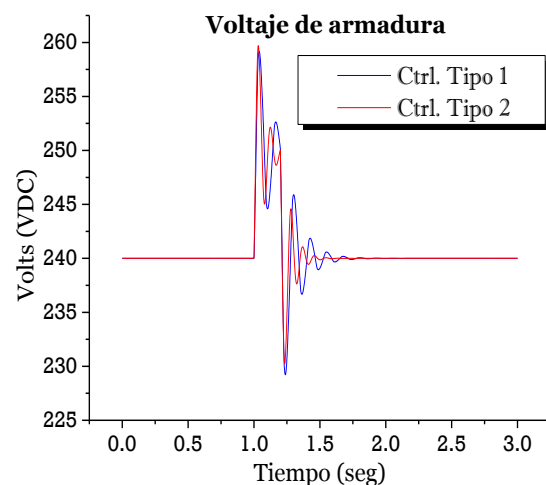


Fig. 12. Voltaje de armadura sin ruido en el par externo de carga

A, velocidad nominal 120.14 red/seg \approx 1147 rpm y par externo de carga de 29.2 N-m.

El modelo no lineal de la máquina CD operando en régimen motor configuración excitación separada, así como la nomenclatura se muestran en el apéndice 4.1.

Los parámetros del motor CD son:

$$R_f = 240\Omega; L_f = 120H; R_a = 0.6\Omega; L_a = 0.012H,$$

$$L_{AF} = 1.8H; M = 1.2; B = 0.35 \frac{kg - m^2}{seg}; pdp = 1.$$

En [11], se realizaron pruebas a pequeños disturbios. Es decir, pequeños cambios en el par

externo de carga mecánica y en la velocidad de referencia a intervalos de tiempo específicos.

El controlador difuso tipo-2 con nueve reglas mostró mejor desempeño que el convencional tipo 1 con 25 reglas. Esto indica que un control difuso tipo-2 con menor conocimiento mostró mejor desempeño. Por lo que aquí se analiza el controlador tipo-2 con el menor número de reglas ante un gran disturbio en el par externo de carga, así como situaciones con y sin incertidumbre. Además, en [11] se utilizó el algoritmo convencional de Karnik & Mendel.

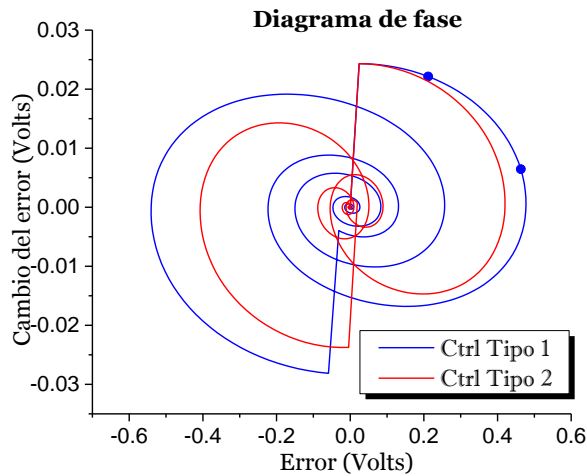


Fig. 13. Diagrama de fase de los controladores, sin ruido en el par externo de carga

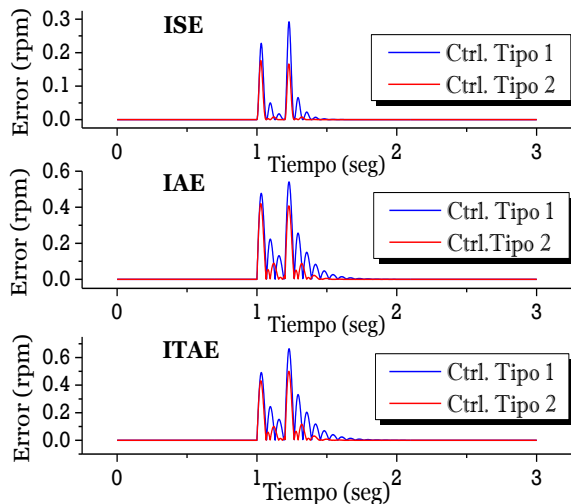


Fig. 14. Índices del error, sin ruido en el par externo de carga

Tabla 4. Índices de error, sin ruido en el par externo de carga

Índice de error	Control Tipo 1	Control Tipo 2
ISE	0.0220	0.0108
IAE	0.0799	0.0424
ITAE	0.0962	0.0489

En las presentes simulaciones se ocupó el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel presentado en la sección 2.2. En el apéndice 4.2 se muestra como este último es superior a su predecesor Karnik & Mendel convencional, en el número de iteraciones. En todos los casos se compara el desempeño de un controlador difuso PI tipo-1, y un controlador difuso PI tipo-2 en intervalos. El control difuso tipo-1 es del tipo Mandami. Y es similar al utilizado en [15, 16, 17, 19, 20].

Se utilizan tres funciones de membresía triangulares para ambos universos de discurso de las variables de entrada e y Δe (error y cambio del error respectivamente). La incertidumbre para los conjuntos difusos tipo 2 son: $\delta_{error} = 1$, $\delta_{\Delta error} = 0.01$. Las barras de salida y las reglas difusas son idénticas para ambos controladores. Estos parámetros son tomados de las pruebas hechas en [11]. La diferencia en el diseño está en la incertidumbre para los conjuntos difusos tipo-2 así como el algoritmo de reducción de tipo para el procesamiento de la salida del controlador tipo-2.

En el apéndice 4.2 se muestra un menor número de operaciones realizadas por EKM sobre KM. De aquí que el controlador utilizado es más eficiente en tiempo de respuesta que el utilizado en [11].

3.1. Disturbio grande en carga mecánica sin ruido

Se considera al motor operando a valores nominales, simulando un aumento en el par externo de carga mecánica a un valor igual a dos veces del valor nominal. Es decir un ΔT_m del 100% sobre el valor nominal. Este disturbio sucede en el primer segundo de simulación con duración de 0.2 segundos. La señal de disturbio es rectangular, figura 10.

3.2. Disturbio grande en carga mecánica con ruido

Para este caso se considera condiciones de arranque y disturbio similares a 3.1, pero agregando ruido en el par externo de carga mecánica.

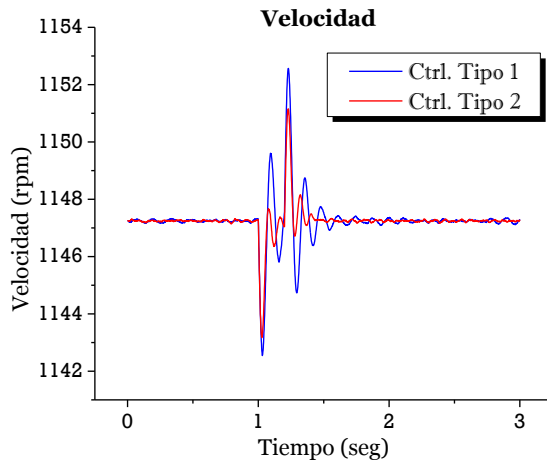


Fig. 15. Comportamiento de la velocidad, con ruido en el par externo de carga

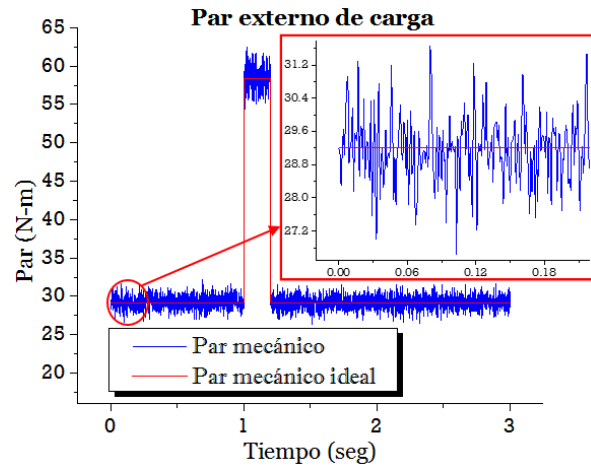


Fig. 16. Disturbio en la carga, con ruido

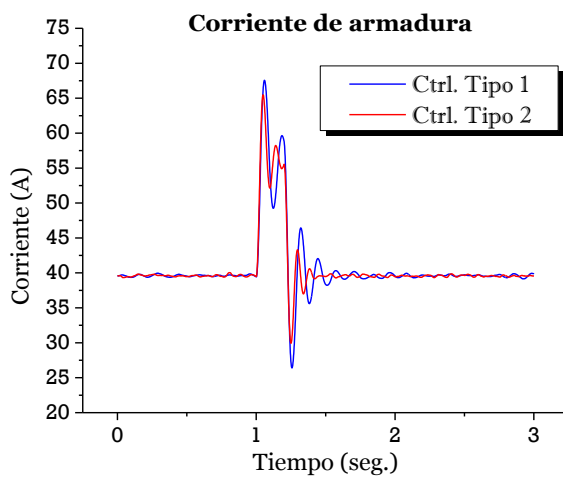


Fig. 17. Comportamiento de la corriente de armadura, con ruido en el par externo de carga

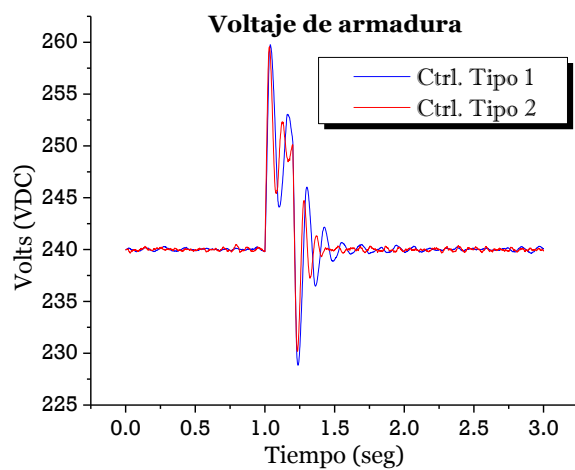


Fig. 18. Voltaje de armadura con ruido en el par externo de carga

Esto se logra mediante la generación de números aleatorios $rand$ con una distribución normal $N(0,1)$.

Para generar el un valor aleatorio C con distribución normal con media en A y una desviación estándar B , se tiene:

$$C = A + B * rand. \quad (7)$$

Entonces, para generar el ruido en el par externo de carga con una desviación estándar del

3% del valor actual del par (con lo que se tendrá una banda de variación en $\approx \pm 9\%$), que se realiza en cada paso de integración:

$$T_m = T_{m_ideal} + (T_{m_ideal} * 0.03) * rand, \quad (8)$$

donde T_{m_ideal} tiene un valor constante para determinados intervalos de tiempo durante la simulación:

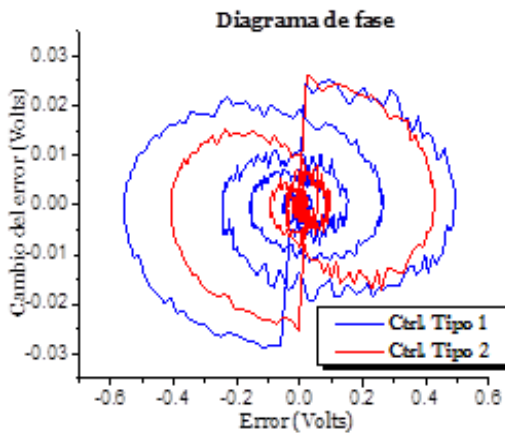


Fig.19. Diagrama de fase de los controladores, con ruido en el par externo de carga

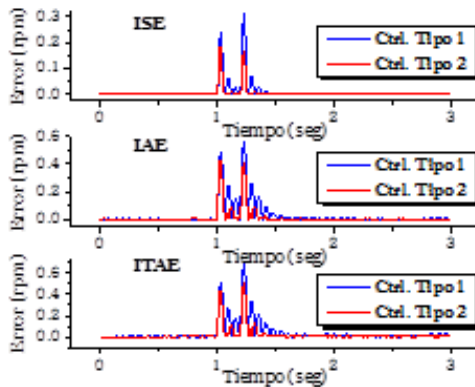


Fig. 20. Índices del error, con ruido en el par externo de carga

Tabla 5. Índices de error, con ruido en el par externo de carga

Índice de error	Control Tipo 1	Control Tipo 2
ISE	0.0223	0.0107
IAE	0.0873	0.0454
ITAE	0.1082	0.0536

$$T_{m_ideal} \begin{cases} 29.2; & 0 \leq t < 1 \\ 58.4; & 1 \leq t \leq 1.02 \\ 29.2; & t \geq 1.02 \end{cases} \quad (9)$$

$T_{m_ideal} = 58.4$, es el incremento del 100% del valor del par en plena carga, para la simulación del disturbio. El resultado es mostrado en la figura 17.

3.3. Respuesta ante un disturbio pequeño en la velocidad de referencia

Con el fin de mostrar el comportamiento del controlador tipo-2 ante pequeños disturbios, se presenta un cambio del 10% en la velocidad de referencia, y se analiza la respuesta dinámica de ambos controladores.

Para los resultados mostrados en la tabla anterior, el cambio de carga del 10% representa aproximadamente un $\Delta vel = 114.7 Rpm$, y la banda de tiempo de estabilización considerada fue de $\pm 1\%$.

3. Conclusiones

Los controladores difusos son poderosas herramientas de control no convencional para la implementación en sistemas de control en sistemas no lineales. El controlador difuso en intervalos PI tipo-2 estudiado en este trabajo muestra mejores resultados en desempeño en la respuesta en el tiempo y en los índices de error, para un gran disturbio en el par externo de carga con y sin ruido, que el PI tipo-1. Esto demuestra la robustez de los controles difusos tipo-1 y tipo-2, cuando el sistema de control es llevado a zonas de no linealidad e inestabilidad. La respuesta no lineal de ambos controladores se puede observar en las figuras 12 y 18.

La distorsión en los diagramas de fase de ambos controladores es el resultado de las incertidumbres añadidas en el disturbio. De estos diagramas es posible notar el desempeño no lineal de ambos controladores para mantener control sobre el sistema.

El control tipo-2 mostró una mejor respuesta dinámica ante un disturbio pequeño en la velocidad de referencia que el control tipo-1.

El algoritmo de reducción de tipo utilizado en este trabajo fue el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel.

El cual presenta menor tiempo de ejecución, ya que converge en forma más rápida que el tradicional Karnik & Mendel (Apéndice 4.2). Esta

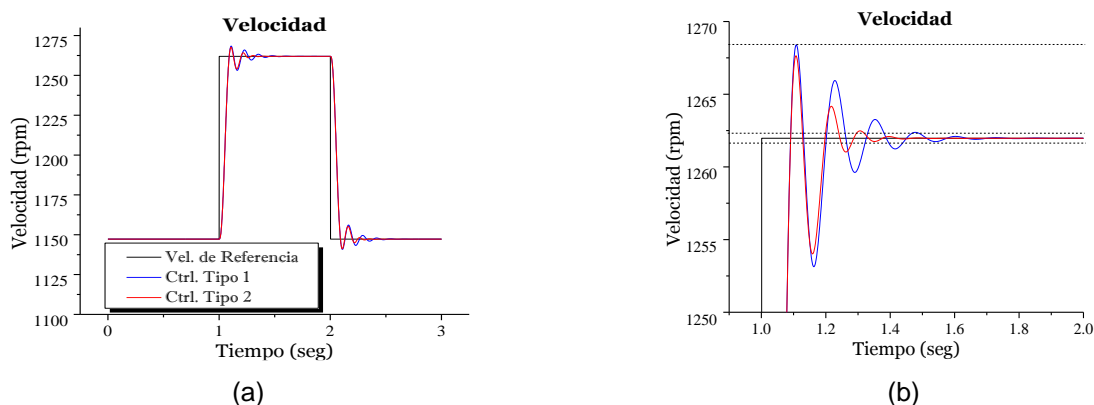


Fig. 21. Respuesta dinámica ante un cambio en la referencia de la velocidad: a) respuesta dinámica; b) acercamiento de la respuesta

característica es importante para futuras implementaciones de control en tiempo real.

Tabla 6. Índices de comportamiento dinámico a pequeños disturbios

Índice	Control Tipo 1	Control Tipo 2
% de Sobretiro	5.58	4.96
Tiempo de respuesta (seg)	0.055	0.055
Tiempo de estabilización (seg)	0.364	0.234
Tiempo en alcanzar el valor pico (seg)	0.110	0.109

De todas las simulaciones realizadas las funciones de membresía, número de reglas difusas, número de barras de salida y tablas de reglas difusas con las que se obtuvieron los mejores resultados, se muestran en las figuras 6, 7, 8 y tabla 3. Estas son variables comunes para ambos controladores tipo 1 y 2.

El controlador tipo-2 comparado con el tipo-1, requiere, además, la selección del algoritmo de reducción de tipo y la cantidad de incertidumbre de los conjuntos difusos de entrada, para la sintonización. Lo cual si no se tiene mucha experiencia resulta complejo para el diseño del controlador. Se recomienda inicializar el controlador difuso tipo-2 con los resultados sintonizados de un control difuso tipo-1.

Para futuros trabajos se propone la implementación en laboratorio en base a un microcontrolador, ya que se pueden presentar problemas particulares de investigación. debido a que se requiere una buena ingeniería de software por las grandes cantidades de operaciones a realizar [25, 30, 31, 32].

4. Apéndices

4.1. Modelo del motor de corriente directa

El modelo matemático de un motor en configuración excitación separada se obtiene mediante un análisis de los circuitos eléctricos que involucran al sistema eléctrico y una ecuación que exprese la dinámica física de la parte mecánica [10,12]. Los circuitos equivalentes del motor CD se muestra a continuación:

El sistema de ecuaciones diferenciales en variables de estado que modela al motor de corriente directa es:

$$\begin{aligned} \frac{di_f}{dt} &= \frac{1}{L_f} v_f - \frac{R_f}{L_f} i_f \\ \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{L_a} v_a - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{E}{L_a}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{T_e}{M} - \frac{T_m}{M} - \frac{B\omega}{M}, \end{aligned} \quad (10)$$

donde $E = L_{AF}\omega i_f$ y $T_e = p \cdot d \cdot p \cdot (L_{AF}i_a i_f)$.

La nomenclatura es la siguiente:

- v_f = Voltaje de campo.
- R_f = Resistencia de campo.
- L_f = Inductancia de campo.
- i_f = Corriente de campo.
- v_a = Voltaje de armadura.
- R_a = Resistencia de armadura.
- L_a = Inductancia de armadura.
- i_a = Corriente de armadura.
- L_{AF} = Inductancia mutua entre campo y armadura
- ω = Velocidad del rotor.
- E = Voltaje inducido en el circuito de la armadura.
- M = Momento de inercia del rotor.
- B = Coeficiente de amortiguamiento.
- T_m = Par mecánico o de carga.
- T_e = Par eléctrico.
- $p.d.p$ indica el número de par de polos.

4.2 Número de Iteraciones del Algoritmo Karnik & Mendel (KM) y del Algoritmo Mejorado Karnik & Mendel (EKM)

Para las condiciones dadas en 3.1 (condiciones ideales), el comportamiento del controlador difuso tipo-2 operando con KM y EKM es idéntico, es decir ambos algoritmos convergen al mismo resultado para el mismo instante de tiempo de simulación. La principal diferencia radica en el número de iteraciones que ambos algoritmos ocupan para obtener el resultado final.

Ambos algoritmos se ocupan en encontrar los puntos de conmutación y_l y y_r [7, 23], para luego promediar entre estos puntos. Para el análisis de desempeño, se compara el número de iteraciones que ambos controladores desarrollan durante el tiempo de simulación.

Como puede observarse en las figuras 23 y 24, ambos algoritmos de reducción de tipo utilizan una iteración durante el primer segundo de simulación (estado estacionario). Se tiene un disturbio de 0.2 segundos y de ahí en adelante el algoritmo KM utiliza entre 3 y 4 iteraciones para converger al resultado de y_l y y_r .

Mientras que el EKM presenta un menor tiempo de ejecución, ya que utiliza siempre una sola iteración para converger al resultado.

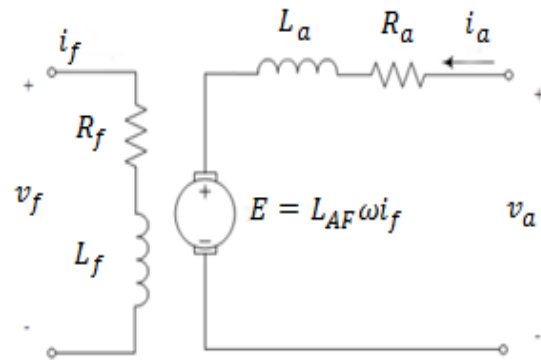


Fig. 22. Circuitos equivalentes del motor DC

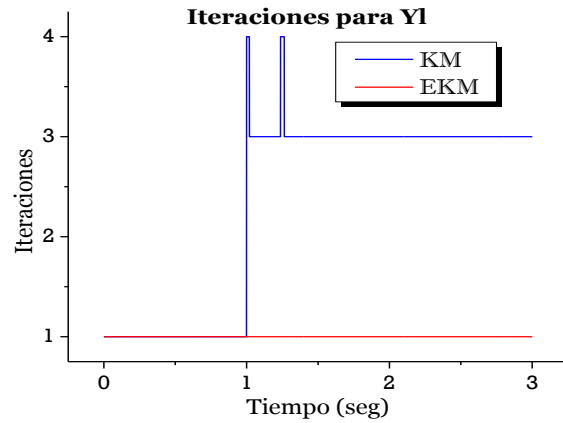


Fig. 23. Número de iteraciones desarrollado por KM y EKM para la obtención de y_l

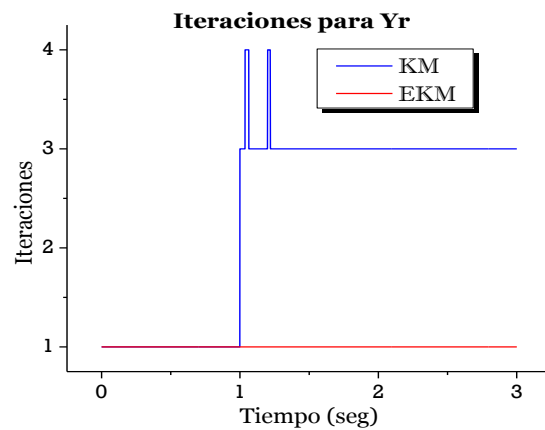


Fig. 24. Número de iteraciones desarrollado por KM y EKM para la obtención de y_r

Agradecimientos

Los autores agradecen la beca otorgada por el CONACyT para que el primer autor curse actualmente sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la SEPI-ESIME-Zacatenco del IPN. Se agradece a los revisores sus valiosos comentarios y recomendaciones que han servido para mejorar el artículo.

Referencias

1. Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*.
2. Zadeh, L. (1965). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1. *Information Sciences*, Vol. 8, pp. 149–249.
3. Hagrás, H. (2007). Type-2 FCLs: A New Generation on Fuzzy Controllers. *IEEE Computational Intelligence Magazine*.
4. Karnik, N. & Mendel, J. (1998). Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, DOI: 10.1109/FUZZY.1998.686240.
5. Karnik, N., Mendel, J., & Liang, Q. (1999). Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 6, pp. 643–58. DOI: 10.1109/91.811231.
6. Mendel, J. & John, R. (2002). Type-2 Fuzzy Sets Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 10, No. 2. DOI: 10.1109/91.995115.
7. Mendel, J. (2001). *Uncertain Ruled-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Prentice Hall.
8. Mendel, J., John, R., & Liu, F. (2006). Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 6, pp. 808–821. DOI: 10.1109/TFUZZ.2006.879986.
9. Wu, D. & Mendel, J.M. (2009). Enhanced Karnik-Mendel Algorithms. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 923–934. DOI: 10.1109/TFUZZ.2008.924329.
10. Hernández, G. (1997). *Control Difuso de Velocidad De un Motor de Corriente Directa*. SEPI-ESIME-Zacatenco.
11. Moo, E. & Romero, D. (2014). Controlador de Velocidad Difuso Tipo 2 para un Motor CD Excitación Separada. *XXVII Reunión Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial RVP-AI*.
12. Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of the Electric Machinery and Drive Systems*. Third Edition, Wiley.
13. Krause, P., Wasynczuk, O., & Pekarek, S. (2012). *Electromechanical Motion Devices*. IEEE, Wiley.
14. Sul, S. (2011). *Control of Electric Machine Drive Systems*. Wiley.
15. Lorandi, A., Hermida, G., Guevara, E., & Hernández, J. (2011). Controladores PID y Controladores Difusos. *Revista de la Ingeniería Industrial*. Vol. 5, No. 1, pp. 1–13.
16. Deepshikha-Kumar, R. (2014). A Fuzzy Logic Speed Controller for Separately Excited Dc Motor and Its Comparison with PID Speed Controller. *(IOSR) Journal of Electric and Electronics Engineering*, Vol. 9, No. 4.
17. Natsheh, E. & Buragga, K. (2010). Comparison between Conventional and Fuzzy Logic PID Controllers for Controlling DC Motors. *(IJCSI) International Journal of Computer Science Issues*, Vol 7, No. 5, pp. 128–134.
18. Fayek, H. & Elamvazuthi, I. (2012). Type-2 Fuzzy Logic PI (T2FLPI) Based DC Servomotor Control. *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 8, No. 5, pp. 2564–2574.
19. Adewuyi, P. (2013). DC Motor Speed Control: A Case between PID Controller and Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 36–40.
20. Bansal, U. & Narvey, R. (2013). Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*. Vol. 3, No. 9, pp. 1209–1220.
21. Moo, E., Cortés, R., & Romero, D. (2014). Control de Velocidad Difuso Sugeno con Parámetros Adaptables por Inferencia Tipo Mamdani para un Motor de CD. *7° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, (CIIES)*.
22. Aliasghary, M., Eksin, İ., Güzelkaya, M., & Kumbasar, T. (2012). Design of an Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller Based on Conventional PI Controller. *Mediterranean Conference on Control & Automation*, pp.3–6. DOI:10.1109/MED.2012.6265708.
23. Mendel, J., Hagrás, H., Tan, W., Melek, W., & Ying, H. (2014). *Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Control*. Wiley.
24. Hossein, H. & Jafar, Z. (2015). Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for the Speed Control of DC Motors. *Systems Science & Control*

- Engineering: An Open Access Journal*. Vol. 5, pp. 266–273. DOI: 10.1080/21642583.2015.1013644.
25. **Maldonado, Y. & Castillo, O. (2012)**. Genetic Design of an Interval Type-2 Fuzzy Controller for Velocity Regulation in a DC Motor. *International Journal of Advanced Robotics System*, Vol. 9, pp. 204.
 26. **Farfán, R., Ruz, J., Rullán, J., Torres, W., & García, R. (2013)**. Control Difuso Tipo 2 con Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Sevomecanismo. *Congreso Nacional de Control Automático*.
 27. **Abdullah, I. & Ayman, A. (2008)**. The Advantages of PID Fuzzy Controllers over the Conventional Types. *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 5, No. 6, pp. 653–658.
 28. **Varshavsky, V., Marakhovsky, V., Levin, I., & Saito, H. (2001)**. Hardware Implementation of Fuzzy Controllers. *Chapter 1 of Fuzzy Controllers, Theory and Application*. [http://intechopen.com/](http://intechopen.com/books/fuzzcontrollers-theory-and-application/hardware-implementation-of-fuzzy-controllers)
 29. **Yan, H., Lei, Y., Pang, D., & Han, X. (2016)**. Research of Speed Control System for DC Motor Based on Fuzzy PID. *Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation*.
 30. **Istepanian, R. & Whidborne, J. (2001)**. *Digital Controller Implementation and Fragility*. Springer Verlag London Ltd.
 31. **Bryk, M. & Wielgus, A. (2010)**. Digital Implementation of a Programmable Type-2 Fuzzy Logic Controller. *International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*.
 32. **Leottau, L. & Melgarejo, M. (2010)**. *Implementing an Interval Type-2 Fuzzy Processor onto a DSC56F8013*.

Article received on 20/05/2015; accepted on 24/10/2016.
Corresponding author is Emilio R. Moo Medina.