

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CONTROLADORES DIFUSOS APLICADOS A MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Rubén González Orozco, José Luis González Vázquez
Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
Calzada Tecnológico 14418, Mesa de Otay, Tijuana, B.C., CP22390
+52 (664) 6821033 - 5800
Correo-e: rubenglezor@gmail.com, jose.gonzalez@uabc.ed.mx

RESUMEN.

El control difuso es una alternativa atractiva para el control de plantas cuando el modelo analítico es impreciso, complejo o no está disponible. Sin embargo no hay consenso respecto a una metodología a emplear para el diseño de los controladores difusos. En este trabajo se presenta una metodología genérica para el diseño y ajuste fino de un controlador difuso tipo Mamdani libre de modelo analítico aplicado a motores de C.D. de imán permanente. En la metodología propuesta se hace uso de observaciones empíricas del motor para generar un controlador difuso que es normalizado a las condiciones particulares de este. Se incluye una metodología para el ajuste fino que particularice el controlador al motor. Se presentan las pruebas y simulaciones que demuestran la versatilidad de la metodología y su portabilidad a otros modelos de motores.

Palabras Clave: lógica difusa, Mamdani, control difuso, ajuste fino

ABSTRACT.

Fuzzy control is an attractive alternative for controlling plants when the analytical model is vague, complex or unavailable. However there is no consensus on a methodology to be used for the fuzzy controllers design. This paper presents a generic methodology for the design and fine adjustment of a Mamdani type fuzzy controller free of analytical model applied to permanent magnet DC motors. The proposed methodology uses empirical observations of the motor to generate a fuzzy controller which is normalized to the particular motor conditions. A methodology for fine adjustment that particularize the controller is included. Tests and simulations to demonstrate the versatility of the methodology and its portability to other motors models are presented.

Keywords: fuzzy logic, Mamdani, fuzzy control, fine adjustment

1. INTRODUCCIÓN

Para el diseño de controladores clásicos (como el PID) se requiere del modelo analítico de la planta que se pretende controlar. Un modelo analítico es el conjunto de ecuaciones que representan la dinámica de una planta con precisión [1], sin embargo es muy común que a) algunos parámetros de la planta no se incluyan en el modelo debido a su baja trascendencia (como el envejecimiento de la planta), b) que los parámetros tengan dependencia a factores externos no controlables ni predecibles (humedad, temperatura ambiente, etc.), c) que los parámetros no sean del todo exactos o sean variantes en el tiempo.

Al desarrollarse un controlador por métodos clásicos, cualquier imprecisión en el modelo analítico se refleja en un rendimiento sub-óptimo del controlador. En casos de plantas complejas es posible que no se cuente con un modelo de la planta, haciendo imposible el desarrollo de un controlador. En estos casos el control difuso representa un área de oportunidad.

1.1. Lógica Difusa

La lógica difusa pretende describir cualidades de un sistema por medio de variables lingüísticas y reglas de relación entre estas. Una variable lingüística granula valores escalares en conjuntos difusos, estos consisten en un conjunto de valores (condiciones) de la variable lingüística con grados de membresía parcial a dicho conjunto. Por ejemplo, consideremos como variable lingüística el 'cielo' y como conjuntos difusos 'despejado' y 'nublado'. No todos los días el cielo se encuentra estrictamente nublado o despejado, usualmente cuentan con cierto grado de pertenencia a ambos conjuntos. Esta lógica se asemeja al razonamiento cotidiano y es por ello que resulta natural de implementar.

1.2. Controladores Difusos

Utilizando la lógica difusa es posible desarrollar controladores difusos procesando las entradas como variables lingüísticas (proceso llamado fusificación) y agrupando sus valores en conjuntos difusos. El grado de pertenencia de las variables a los conjuntos difusos se asigna empleando funciones de membresía. La máquina de inferencia difusa utilizada en el presente trabajo es del tipo Mamdani, el cual se asemeja al lenguaje y razonamiento humano. Esta máquina de inferencia proporciona una salida lingüística, la cual es desfusificada en un valor numérico [2]. Para reducir la carga computacional las funciones de membresía utilizadas en este trabajo serán triangulares y trapezoidales.

1.3. Tolerancia a la Imprecisión de la Planta

Al estar basado en el conocimiento empírico es posible desarrollar controladores con resultados semejantes a los otorgados por controladores diseñados utilizando métodos clásicos sin necesidad de tener un modelo de la planta. De igual manera el controlador puede presentar un mayor grado de

tolerancia a variables que afectan a la planta y que no son contempladas en modelos analíticos [3].

2. DESARROLLO DEL CONTROLADOR

La metodología propuesta parte del conocimiento empírico sobre el funcionamiento de un motor de C.D. para diseñar un controlador difuso dentro de un contexto general, y realizar ajustes finos que mejoren el rendimiento para el motor empleado.

2.1. Variable de Entrada: Error

La variable que deseamos controlar en un motor es su velocidad de giro, misma que es retroalimentada. Una entrada del controlador difuso es el error, que es valor resultante de la resta entre la velocidad deseada y la velocidad medida, este valor corresponde a la primera variable lingüística: Error (Er).

Dependiendo del valor Er tendrá membresía a alguno de los siguientes conjuntos difusos: Error Negativo (EN), Error Negativo Pequeño (ENP), Error Nulo (ENu), Error Positivo Pequeño (EPP) o Error Positivo (EP). El error que entra al controlador es normalizado respecto a la velocidad deseada como se muestra en la Fig. 4. Las funciones de membresía de la variable Er se muestran en la Fig. 1, con una distribución inicial X_1, X_2, \dots, X_5 de -0.2, -0.05, 0.0, 0.05, 0.2 respectivamente.

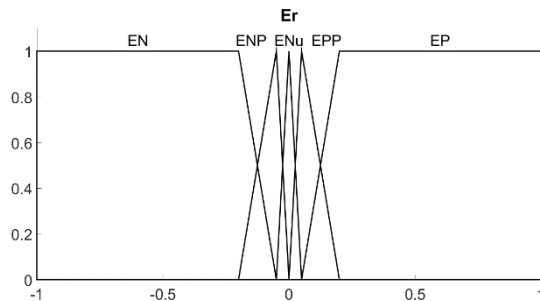


Figura 1. Funciones de membresía de la variable de entrada Er

2.2. Variable de Entrada: Cambio de Error

La segunda variable lingüística de entrada es el Cambio del Error (CEr), que se entiende como aceleración. El CEr contará con las funciones de membresía: Cambio de Error Negativo (CEN), Cambio de Error Negativo Pequeño (CENP), Cambio de Error Nulo (CENu), Cambio de Error Positivo Pequeño (CEPP) y Cambio de Error Positivo (CEP).

Para definir el dominio de distribución de estos conjuntos difusos es necesario conocer el comportamiento del motor y la tasa de muestreo. Supóngase una tasa de muestreo de 1 ms y que al motor a lazo abierto le toma 50 ms alcanzar la velocidad de 50 rad/s, es decir, la diferencia promedio de velocidad entre cada muestra es de 1 rad/s lo que equivale al 2% (0.02) de la

velocidad deseada. Este sería el dominio de la variable CEr. Con esta información se propone la distribución inicial de las funciones de membresía mostradas en la Fig. 2, donde Y_1, Y_2, \dots, Y_5 están ubicadas en -0.010, -0.005, 0.0, 0.005, 0.010 respectivamente. Cabe mencionar que a diferencia de Er, el dominio de CEr deberá ajustarse a cada motor y cada tasa de muestreo.

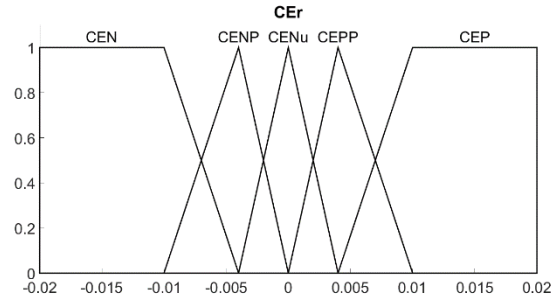


Figura 2. Funciones de membresía de la variable CEr.

2.3. Variable de Salida

Las funciones de membresía pertenecientes a la salida siguen el mismo esquema que Er, formulándose 5 funciones de membresía distribuidas en el intervalo -1 a +1, que desnormalizado cumple una relación 1 a 1 con el valor de voltaje a incrementar o decrementar en la fuente. Las funciones de salida son Decremento (D), Mínimo Decremento (MD), Mantener (M), Mínimo Incremento (MI) e Incremento (I) como se muestran en la Fig. 3, con una distribución inicial de Z_1, Z_2, \dots, Z_5 de -0.2, -0.05, 0.0, 0.05, 0.2 respectivamente.

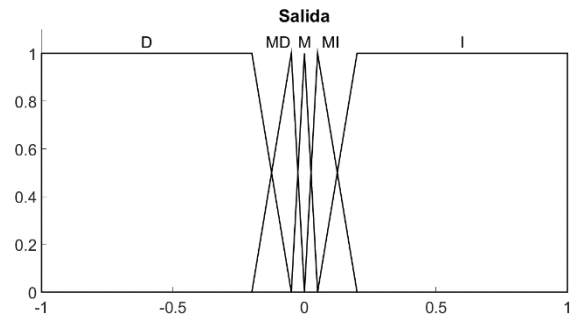


Figura 3. Funciones de membresía de la variable de salida

2.4. Reglas

Se propone que las reglas que relacionan las variables de entrada con la de salida guarden una consistencia básica, tal como se describen en la Tabla I, y que posterior a la puesta en marcha del controlador se realicen ajustes finos de ser necesario.

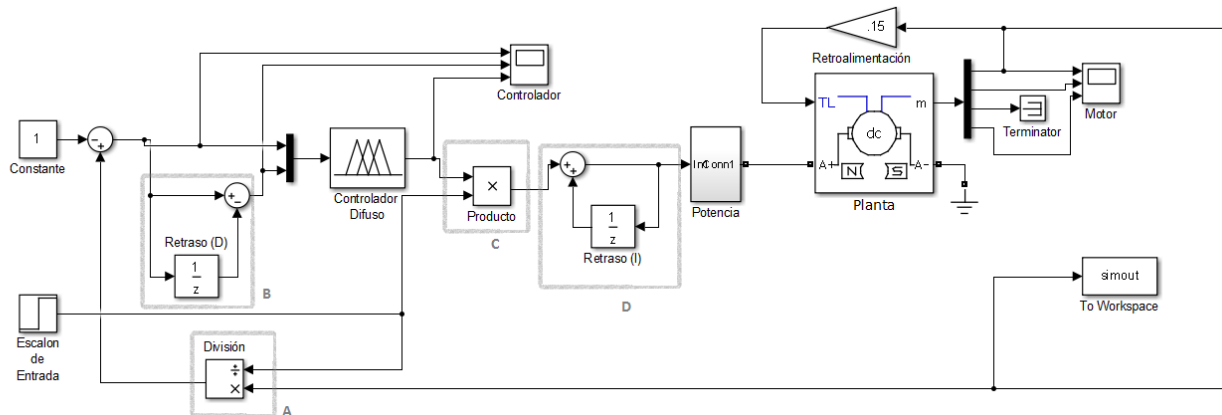


Figura 4. Montaje experimental en Simulink

Tabla I. Reglas del controlador difuso

		CEr				
		EN	ENP	EN	EPP	EP
Er	CEN	I	I	MI	MI	M
	CENP	I	MI	MI	M	MD
	CENu	MI	MI	M	MD	MD
	CEPP	MI	M	MD	MD	D
	CEP	M	MD	MD	D	D

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

A fin de comprobar la metodología desarrollada se simula en Simulink la planta descrita en la Fig. 4, utilizando un modelo analítico del motor pero sus parámetros no son empleados en el diseño del controlador difuso.

La velocidad deseada para el motor es introducida en el escalón de entrada y pasa por el controlador, el cual se conecta a la etapa de potencia que se encarga de alimentar al motor. La velocidad del motor es retroalimentada. Para lograr hacer la tarea de control es necesario implementar las siguientes etapas complementarias.

3.1. Normalizar (A)

En esta etapa, el valor de radianes por segundo, obtenido de la velocidad del motor, es normalizado dividiéndolo entre el valor de la velocidad deseada.

3.2. Cambio de Error (B)

Al valor de error obtenido de la retroalimentación se le resta el valor de error de la muestra anterior para de esta forma obtener el valor de CEr.

3.3. Desnormalizar (C)

La salida obtenida del controlador difuso es multiplicado por el valor de velocidad deseada, de esta forma se obtiene la salida desnormalizada.

3.4. Integrador (D)

El incremento que se le debe de dar al voltaje de alimentación del motor se le suma el valor de alimentación anterior del motor.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

La metodología propuesta es probada en la plataforma virtual de la Fig. 4. En el diseño del controlador se realizó sin conocer los parámetros del motor, los cuales se muestran en la tabla II, que se emplean exclusivamente en la ejecución de la simulación. Se supondrá que la velocidad deseada corresponde a una función escalón de 50 rad/s, y una tasa de muestreo de 1 ms. A continuación se documentan las pruebas realizadas para validar la metodología.

Tabla II. Parámetros del motor 'A'

Constante	Valor
Resistencia de Armadura (ohms)	1.2
Inductancia de Armadura (H)	0.012
Fuerza Contraelectromotriz (V/rpm)	0.4
Inercia Total ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.5
Coefficiente de Fricción Viscosa ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)	0.05
Torque de Carga Mecánica ($\text{N} \cdot \text{m}$)	0.15

4.1. Prueba Inicial de Arranque

El controlador difuso se implementa como fue descrito en las Figs 1-3, con las reglas de la Tabla I. El comportamiento presentado por el motor se muestra en la Fig. 5.

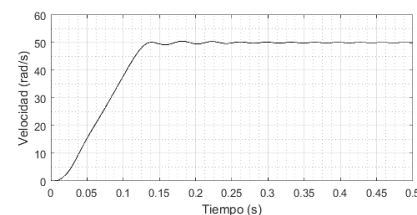


Figura 5. Respuesta del motor con el controlador sin ajustar

Se observa una función de control de la velocidad, contando con un error en estado estable de 0%, un sobretiro del 1.06% y un tiempo de asentamiento de 129 ms (se considera el tiempo de asentamiento a partir del cual la velocidad se mantiene a un error menor del $\pm 2\%$ de la velocidad deseada). Dependiendo de la aplicación se podría argumentar que este controlador, realizado sin el modelo analítico de la planta, tiene un rendimiento satisfactorio.

4.2. Ajuste Fino del Controlador

A fin de demostrar la versatilidad de la metodología y del ajuste fino, se cambia el motor por otro con parámetros como los descritos en la Tabla III. Este motor a la prueba Inicial de Arranque logró rendimientos con sobretiro del 0.18% con un tiempo de asentamiento de 155 ms.

Tabla III. Parámetros del motor 'B'

Constante	Valor
Resistencia de Armadura (ohms)	1.2
Inductancia de Armadura (H)	0.012
Fuerza Contraelectromotriz (V/rpm)	0.8
Inercia Total ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.7
Coefficiente de Fricción Viscosa ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	0.04
Torque de Carga Mecánica ($\text{N}\cdot\text{m}$)	0.15

Suponiéndose que este rendimiento no fuera satisfactorio se procedería a realizar un ajuste fino del controlador. El primer paso, antes de implementar la metodología de ajuste sería asegurarse que el rango de cambio de error se encuentre cerca del valor apegado al comportamiento del motor y que el rango de la variable de salida no cause una variación de velocidad muy lenta o inestable. Estos valores deben de obtenerse observando, en el caso del rango de CER, la aceleración del motor, ya sea en lazo abierto o con basándose pruebas anteriores. Para el caso del rango de salida debe considerarse la relación existente entre voltaje y velocidad del motor. Cabe mencionar que es posible mantener cierta imprecisión en estos valores, es aquí donde se facilita la implementación de este tipo de controladores.

4.3. Ajuste del Error en Estado Estable

Si el error se encuentra solo en el estado estable es debido a las funciones de membresía de la entrada Er. En el caso de que se presenten oscilaciones en el estado estable debe de ampliarse el rango de las funciones de error nulo y errores pequeños. En caso de encontrar un error en estado estable constante los rangos de estas funciones deberán de acotarse mejor. Si nada de esto sirve se procede a revisar las funciones de membresía de CER. Deberá verificarse las consideraciones que se tienen para un cambio de error nulo y pequeño. Para realizar todo este ajuste es muy recomendable revisar las entradas y salidas del controlador, tal y como se muestra en la Fig. 6. En caso de que una vez seguidos estos pasos se observe un error en estado estable, o tome más tiempo del esperado llegar a estabilizarse,

se modifica el rango de las funciones de membresía de salida dependiendo el caso. Tras los ajustes a las funciones de membresía obtuvimos las funciones de membresía de las Fig. 7 y 8.

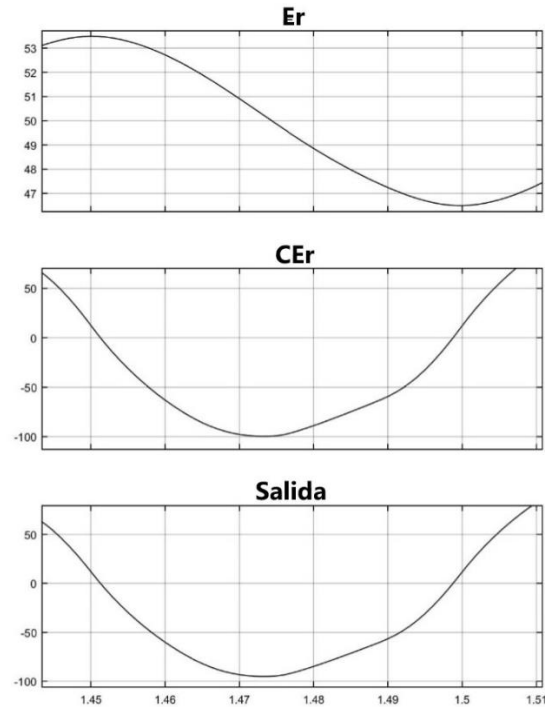


Figura 6. Salidas del controlador para distintas combinaciones de entrada

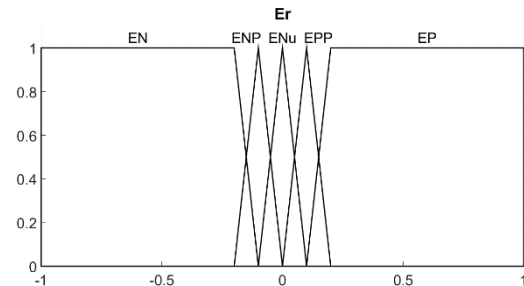


Figura 7. Funciones de membresía de la variable de entrada Er

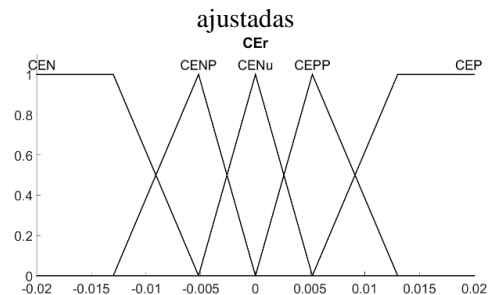


Figura 8. Funciones de membresía de la variable de entrada CER ajustadas.

Tabla V. Resultados del controlador ante distintos conjuntos de reglas y rangos de CEr.

Set de Reglas	a (con el controlador no ajustado)		a		b		c		d	
Rango de CEr	S (%)	A (ms)	S (%)	A (ms)	S (%)	A (ms)	S (%)	A (ms)	S (%)	A (ms)
±0.01	0	239	0	250	0	250	0	331	0	354
±0.015	0	181	0	190	0	191	0	238	0	253
±0.02	0.0180	155	0.0124	158	0.0301	159	0.0102	193	0.0143	199
±0.025	0.1778	141	0.1294	146	0.2144	148	0.1094	166	0.0997	158
±0.03	0.7192	145	0.3290	121	0.3223	141	0.5089	131	0.1324	140
±0.035	0.3041	147	0.9612	142	0.7109	114	1.3297	154	0.7017	122
±0.04	2.3719	149	1.6339	145	1.6339	145	2.2585	151	1.3349	145

4.4. Ajuste de Tiempo de Asentamiento y Sobretiro

Las mejoras del tiempo de asentamiento y el sobretiro dependen principalmente del rango de las funciones de membresía de CEr, el cual deberá ajustarse para obtener un mejor rendimiento. En caso de desear una respuesta más rápida o esta sea demasiado brusca es posible aumentar o reducir el impacto que tienen las entradas en la salida del sistema modificando las reglas dadas para este controlador, tarea que puede facilitarse observando las entradas y salidas de este. Para probar el efecto que tienen las reglas en el rendimiento del controlador, éste se prueba con las reglas mostradas en la tabla IV. A cada conjunto de reglas se le hacen pruebas variando el rango de CEr de 0.001 a 0.05 con incrementos de 0.004. Esto debido a que en rangos menores el sistema responde muy lento y a rangos mayores se vuelve inestable. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla V.

Tabla IV. Conjuntos de reglas probados

a)

		Tasa de Cambio del Error				
		EN	ENP	ENu	EPP	EP
Error	CEN	I	I	I	MI	M
	CENP	I	MI	MI	M	MD
	CENu	MI	MI	M	MD	MD
	CEPP	MI	M	MD	MD	D
	CEP	M	MD	D	D	D

b)

		Tasa de Cambio del Error				
		EN	ENP	ENu	EPP	EP
Error	CEN	I	I	I	MI	MI
	CENP	I	MI	MI	M	MD
	CENu	MI	MI	M	MD	MD
	CEPP	MI	M	MD	MD	D
	CEP	MD	MD	D	D	D

c)

		Tasa de Cambio del Error				
		EN	ENP	ENu	EPP	EP
Error	CEN	I	I	I	I	MI
	CENP	I	MI	MI	M	MD
	CENu	MI	MI	M	MD	MD
	CEPP	MI	M	MD	MD	D
	CEP	MD	D	D	D	D

d)

		Tasa de Cambio del Error				
		EN	ENP	ENu	EPP	EP
Error	CEN	I	I	I	I	I
	CENP	I	MI	MI	M	MD
	CENu	MI	MI	M	MD	MD
	CEPP	MI	M	MD	MD	D
	CEP	D	D	D	D	D

4.5. Diagrama de Flujo de la Metodología

Tras haber realizado el ajuste fino del controlador se presenta el diagrama de flujo de la Fig. 9, la cual pretende concentrar toda la metodología empleada. Cuando en el diagrama de flujo se habla de ajustar se refiere a reducir o aumentar el rango de las funciones de membresía, dependiendo del caso. Al igual el mejorar las reglas consiste en modificar alguna(s) regla(s) de forma que se obtenga una mejor respuesta en el parámetro en cuestión. Se debe tener en cuenta que los motores y controladores tienen limitaciones por lo que es posible que nunca se llegue a la respuesta deseada, por ello si ya no es posible mejorar nada del controlador este será el controlador final, a menos que se desee aumentar el número de las funciones de membresía de alguna variable.

4.6. Portabilidad del Controlador

Una vez que se haya ajustado el controlador con los requisitos deseados para el sistema es posible reutilizarlo en una gran variedad de motores solo modificando los rangos de CEr y de la salida, de forma que se ajusten de mejor manera al motor. Al modificar los rangos se cambia el voltaje otorgado hacia el motor y la apreciación que se tiene de la aceleración. Para demostrar esto se probó la metodología para controlar los motores de la tabla VI. Los resultados obtenidos tras utilizar el primer controlador desarrollado en este trabajo y solo ajustar el rango de CEr se muestran en la tabla VII y en la Fig. 10.

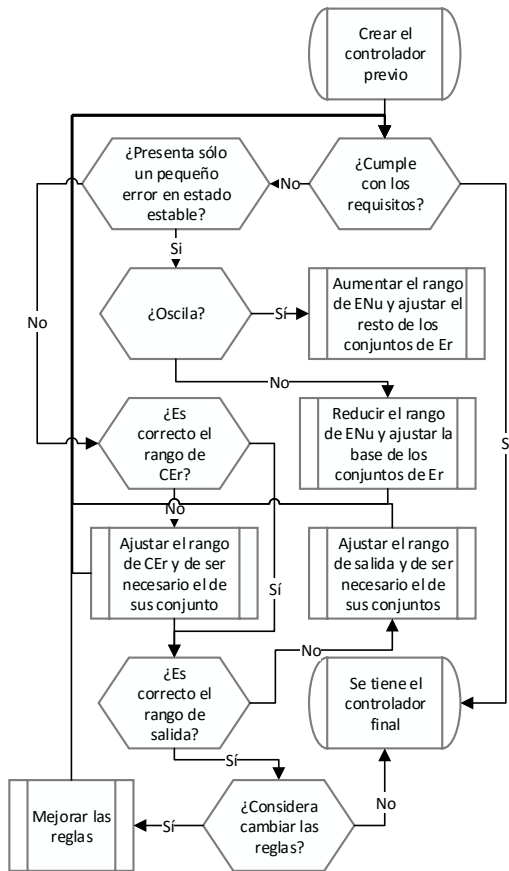


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología deseada.

Tabla VI. Motores utilizados para probar la portabilidad del controlador.

Parámetro	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Resistencia de Armadura (ohms)	1	2	3
Inductancia de Armadura (H)	0.01	0.03	0.05
Fuerza Contraelectromotriz (V/rpm)	0.2	0.6	0.5
Inercia Total (kg*m ²)	0.2	0.4	0.6
Coefficiente de Fricción Viscosa (N*m*s)	0.01	0.07	0.04
Constante de Torque (Nm/A)	0.09	0.15	0.005

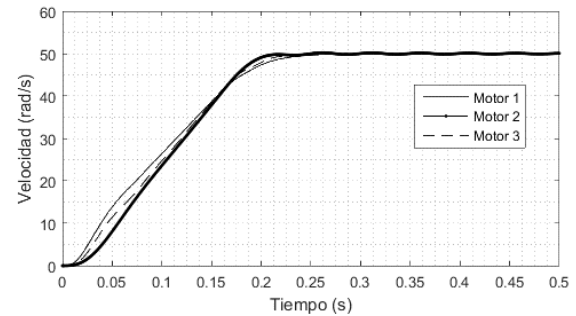


Figura 10. Resultados obtenidos al adaptar el controlador a 3 distintos motores.

Tabla VII. Respuesta obtenida por los motores probados.

	Rango de CEr	Sobretiro	Tiempo de Asentamiento
Motor 1	± 0.01	0%	225 ms
Motor 2	± 0.015	0.4%	199 ms
Motor 3	± 0.018	0.14%	212 ms

5. CONCLUSIONES

Acorde a los resultados obtenidos en este trabajo se demostró que la metodología aquí presentada resulta eficiente para el desarrollo y ajuste fino de controladores difusos, así como la portabilidad de estos. Dicha metodología puede de igual forma implementarse en otro tipo de plantas que presenten un comportamiento similar.

Referencias.

- [1] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 5^{ta} edición, Pearson, 2010
- [2] R. A. Magaña, Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio, Revista de Investigación de Sistemas e Informática, Vol. 7, No. 1, 2010
- [3] A. P. Engelbrecht, Computational Intelligence: An Introduction, 1^{ra} edición, Wiley, 2002
- [4] T. J. Ross, Fuzzy Logic With Engineering Applications, 3^{ra} edición, Wiley, 2010
- [5] L. X. Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control, 1^{ra} edición, Prentice Hall, 1996