



## Fuzzy Controllers Design for Control of the Exciter in a Synchronous Machine

---

Diego Barrera, Oscar J. Suarez and Aldo Pardo Garcia

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 8, 2019

# Diseño de Controladores Fuzzy para el Control de la Excitatriz en una Máquina Síncrona

## Fuzzy Controllers Design for Control of the Exciter in a Synchronous Machine

Diego J. Barrera<sup>1</sup>, Oscar J. Suarez<sup>2</sup>, and Aldo Pardo García<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Primer y tercer autor Universidad de Pamplona, Colombia, [diego.barrera@unipamplona.edu.co](mailto:diego.barrera@unipamplona.edu.co),  
[apardo13@unipamplona.edu.co](mailto:apardo13@unipamplona.edu.co)

<sup>2</sup> Segundo autor Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados - CINVESTAV, México, [javier11213@hotmail.com](mailto:javier11213@hotmail.com)

*Abstract– This paper presents comparison seen from the response offered by three Fuzzy controllers designed in order to exert control on the exciter of a synchronous machine. The controllers (three, five and seven rules) designed contemplate the data that is obtained for the exciter of the synchronous motor in a motor-generator system, using a data acquisition card NI DAQ USB 6009. Simulation results and real time implementation are present in Simulink from Matlab®; which illustrate good performance of the Synchronous Machine.*

**Keywords:** Motor-generator System, Fuzzy Control, Membership Functions Mamdani, NI USB DAQ 6009.

### I. INTRODUCCIÓN

Debido a la gran importancia que tiene ejercer control sobre maquinas eléctricas como lo son los generadores que son implementados en aplicaciones a nivel industrial en diversidad de procesos, se diseñan controladores que como alternativa de control parten del análisis del comportamiento de la excitatriz de la máquina de modo que se pueda establecer la manera en la que se controle la tensión de salida conservando condiciones de consumo de corriente.

En busca de mejorar el desempeño de estas máquinas eléctricas a nivel de control teniendo en cuenta la aplicabilidad de las mismas, se hace necesario inferir en los dispositivos que constituyen como componentes electrónicos y de potencia, el sistema que permite la implementación de los controladores que puedan ser diseñados con fines de establecer el control de la excitatriz de tales máquinas.

Es importante resaltar que el control que se ejerce sobre la excitatriz de máquinas eléctricas busca un control propio de la velocidad, lo cual teniendo en cuenta que está directamente ligado a la regulación por tensión de salida y/o corriente, fija la necesidad de implementación de controladores diferentes a los ON/OFF. Lo antes mencionado establece una necesidad que vincula la existencia de controladores inteligentes como controladores difusos y controladores que emplean redes neuronales; los controladores basados en lógica difusa representan una alternativa que propone la construcción de

controladores para sistemas no lineales a partir de información heurística del sistema [1] que permite ejercer control como resultado del desarrollo del método dando cumplimiento a los elementos que lo componen: fusificación, base de conocimiento, inferencia y defusificación.

La lógica difusa que representa matemáticamente razonamientos e ideas [2] a partir de conjuntos difuso, permite identificar el grado de pertenencia de los elementos que lo componen en función de la teoría de conjuntos, a diferencia de la lógica concreta. Esta estrategia que se basa en el razonamiento, se ve evidenciada en la creación de los mencionados conjuntos difusos que son nombrados lingüísticamente y que se relacionan entre sí a partir de un conjunto de reglas difusas relativas e imprecisas.

En relación al conjunto de reglas, estas representan un elemento de gran importancia en el proceso de defusificación que en conjunto con el sistema de inferencia difusa (SID) permite encontrar un valor concreto de salida. [2]

Dentro de los SID más conocidos se encuentran Mamdani, Takagi-Sugeno y Tsukamoto, en los cuales se utilizan las funciones de membresía de la salida o combinaciones lineales concretas para determinar la salida concreta del controlador en la etapa de defusificación. [2][3]

La respuesta que es generada por este tipo de controladores, los cuales utilizan un procesamiento computacional para el desarrollo de cada etapa presente desde la fusificación hasta la defusificación han logrado representar una alternativa viable en el control de velocidad de máquinas eléctricas, tal es el caso de [4]; el control que es diseñado e implementado es una nueva clase de conjuntos lógicos difusos que pretende inferir sobre la incertidumbre presentada en conjuntos difusos ordinarios. Sin embargo, la arquitectura se basa en el mismo principio de creación de conjuntos difusos nombrados por variables lingüísticas. [2]-[4]

Teniendo en cuenta los beneficios que se tienen al diseñar e implementar controladores difusos [5], tales como flexibilidad y fácil diseño [5][6], este artículo busca mostrar el comportamiento de diferentes controladores difusos, los cuales son diseñados en función de controlar la excitatriz de una maquina síncrona. Inicialmente se realiza un proceso de

**Digital Object Identifier:** (to be inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

identificación a partir del análisis de datos adquiridos utilizando una tarjeta NI USB DAQ 6009 de National Instruments. Una vez se cuenta con los datos que reflejan el comportamiento de la planta (excitatriz de la máquina síncrona), se diseña el controlador; basado en la aplicabilidad mencionada anteriormente y su gran uso en sistemas de control como en [6] y [7].

En busca de identificar el controlador difuso que mejor se comporta en el control de la excitatriz de la máquina síncrona, se diseñan y se comparan controladores tipo fuzzy de tres, cinco y siete reglas, entendiéndose por el controlador difuso de tres reglas, un controlador diseñado con el mínimo de reglas.

En este artículo se diseñan los diferentes controladores planteados, con la intención de establecer una comparación respecto del comportamiento del voltaje de salida. Como referencia para la comparación mencionada, se diseña un controlador de tipo proporcional-integral-derivativo (PID), un controlador difuso tres reglas y de cinco reglas respectivamente.

Por último, se diseña el controlador difuso de siete reglas tomando como punto de partida los controladores difusos planteados como referencia para establecer la comparación de los controladores, en función del comportamiento de la salida.

## II. ADQUISICIÓN DE LA DATA PARA LA EXCITATRIZ DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

La máquina síncrona utilizada es un motor síncrono referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik. Para la adquisición de los datos del sistema, se toma como referencia el voltaje de la excitatriz del motor síncrono y el voltaje que se utiliza para establecer una modulación por ancho de pulso PWM (por sus siglas en inglés). Esto es posible implementando un módulo que incluye un convertidor reductor de corriente directa/ corriente directa (CD/CD), en donde este convertidor CD/CD permite la implementación de las PWM que controlan la velocidad del motor. [8]

Este módulo no solo permite poder implementar el control que parte desde la adquisición de los datos del sistema, en adición, representa una estrategia pedagógica en el área del control de motores, lo que permite contar con una herramienta de fácil acceso y de fácil manejo, que contribuye eficazmente y de manera sencilla en el proceso de identificación de la planta para posterior diseño e implementación de controladores. [9]-[12]

Como se menciona anteriormente, para la adquisición de los datos de salida de la máquina síncrona se emplea una tarjeta NI USB DAQ 6009 de National Instruments, la cual cuenta con ocho canales de entradas analógicas “AI”, dos canales de salidas analógicas “AO”, doce canales de entrada/salidas digitales y un contador de treinta y dos bits con interfaz USB de alta velocidad. [2]

Se realiza una medición voltaje de entrada/voltaje de salida, en donde como equivalente para el sistema del motor síncrono en 1995 rpm (revoluciones por minuto), permite

obtener una salida en modo generador que está comprendida entre 155V y 220V, esto permitiendo un rango de operatividad de 65V para el motor síncrono. [13][14]

Los datos que se obtienen tienen como finalidad mostrar el comportamiento de la excitatriz del motor a partir de los valores de voltaje que son utilizados para manipular las PWM de la entrada, que son utilizadas como señal de control del sistema (ver Fig. 1). La figura muestra cómo se presenta una reacción en la salida ante la entrada de voltaje, utilizada como señal de control.

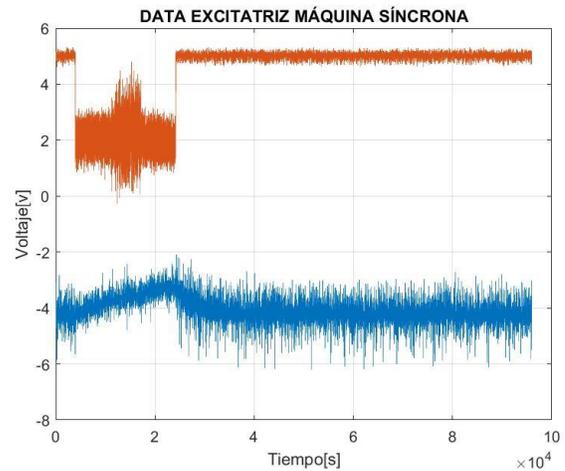


Fig. 1. Respuesta de la excitatriz de la máquina síncrona ante una entrada de control tipo escalón.

Por otra parte, se hace necesario previo al diseño del controlador conocer el comportamiento y la velocidad de respuesta ante las variaciones de la entrada de control. Para estimar la efectividad de la acción de control se realiza una segunda toma de datos para la excitatriz de la máquina síncrona con el fin de visualizar y cuantificar el comportamiento no-lineal del sistema tras un comportamiento predefinido para la señal de control (ver Fig. 2).

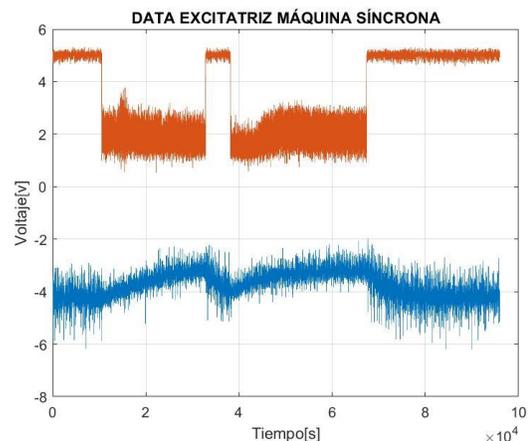


Fig. 2. Respuesta de la excitatriz ante variaciones de la señal de voltaje utilizada como señal de control.

En función de identificar si el sistema cuenta con la capacidad de responder oportunamente ante las variaciones de la señal de control (ver Fig. 3).

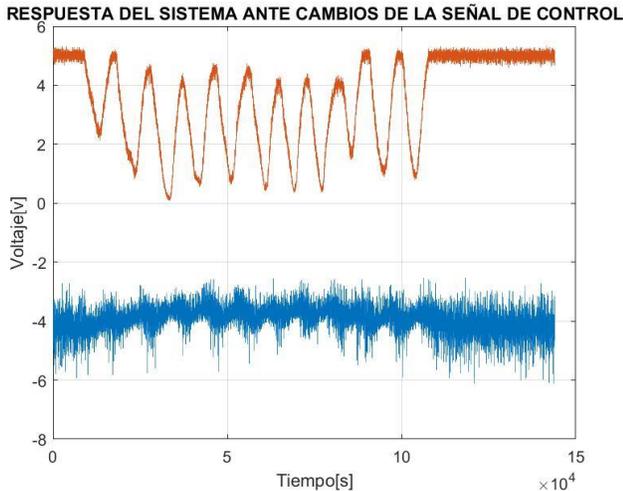


Fig. 3. Respuesta de la excitatriz ante variaciones rápidas de la señal de voltaje utilizada como señal de control.

### III. DISEÑO DE CONTROLADORES

Una vez adquiridos los datos del sistema excitatriz del motor síncrono, en donde es de gran importancia el manejo de la tarjeta de adquisición de datos [16], se diseña el controlador en función de los datos adquiridos.

Como es fundamental contar con una referencia para comparar los controladores diseñados se plantea la utilización de controladores de tipo convencional como lo son por ajuste de parámetros o constantes proporcional-integral (PI) y proporcional-integral-derivativo (PID) por Ziegler & Nichols, los cuales representan una sencilla pero eficiente alternativa para ejercer control. [3][17][18]

Sin embargo, en vez de establecer una comparación más objetiva, se diseña un controlador difuso con el mínimo de reglas que permita identificar de manera clara las ventajas de implementar los controladores difusos propuestos en este artículo.

Para el controlador difuso de tres reglas se definen las siguientes funciones de membresía para las entradas (error y derivada del error) y la salida (voltaje de salida) del sistema:

#### Para la entrada “error”

- Bajo (B), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 1 & x \leq -6,83 \\ -0,20x - 0,385 & -6,83 < x < -1,9 \\ 0 & x \geq -1,9 \end{cases}$$

- Centro (C), es una función triangular definida como,

$$Centro = \begin{cases} 0 & x \leq -1,5 \\ 0,666x + 0,999 & -1,5 < x < 0 \\ -0,666x + 0,999 & 0 < x < 1,5 \\ 0 & x \geq 1,5 \end{cases}$$

- Alto (A), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 1,9 \\ 0,181 - 0,344 & 1,9 < x < 7,411 \\ 1 & x \geq 7,411 \end{cases}$$

#### Para la entrada “derivada del error”

- Negativo (N), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Negativo = \begin{cases} 1 & x \leq -257,9 \\ -0,0042x - 0,0833 & -257,9 < x < -19,85 \\ 0 & x \geq -19,85 \end{cases}$$

- Cero (C), es una función triangular definida como,

$$Cero = \begin{cases} 0 & x \leq -496 \\ 0,00201x + 0,996 & -496 < x < 0 \\ -0,00201x + 0,996 & 0 < x < 496 \\ 0 & x \geq 496 \end{cases}$$

- Positivo (P), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Positivo = \begin{cases} 0 & x \leq 19,85 \\ 0,0036x - 0,0714 & 19,85 < x < 297,6 \\ 1 & x \geq 297,6 \end{cases}$$

#### Para la salida “voltaje de salida”

- Bajo (B), es una función triangular definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq 0,03636 \\ 1,28x - 0,046 & 0,03636 < x < 0,8135 \\ -0,84x + 1,68 & 0,8135 < x < 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

- Medio (M), es una función triangular definida como,

$$Medio = \begin{cases} 0 & x \leq 1,5 \\ 1,078x - 1,617 & 1,5 < x < 2,427 \\ -0,93x + 3,255 & 2,427 < x < 3,5 \\ 0 & x \geq 3,5 \end{cases}$$

- Alto (A), es una función triangular definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 3 \\ 0,852x - 2,556 & 3 < x < 4,173 \\ -1,209x + 6,045 & 4,173 < x < 5 \\ 0 & x \geq 5 \end{cases}$$

Tomando como referencia las entradas y salidas mencionadas, se establece una base de reglas que vincula la relación de pertenencia de cada elemento en los conjuntos difusos y su influencia en la salida del sistema. En la tabla 1 se puede apreciar la base de reglas establecidas para el controlador difuso 3 reglas.

TABLA I  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO DE TRES REGLAS

	N	C	P
B	B	B	B
C	M	M	M
A	A	M	A

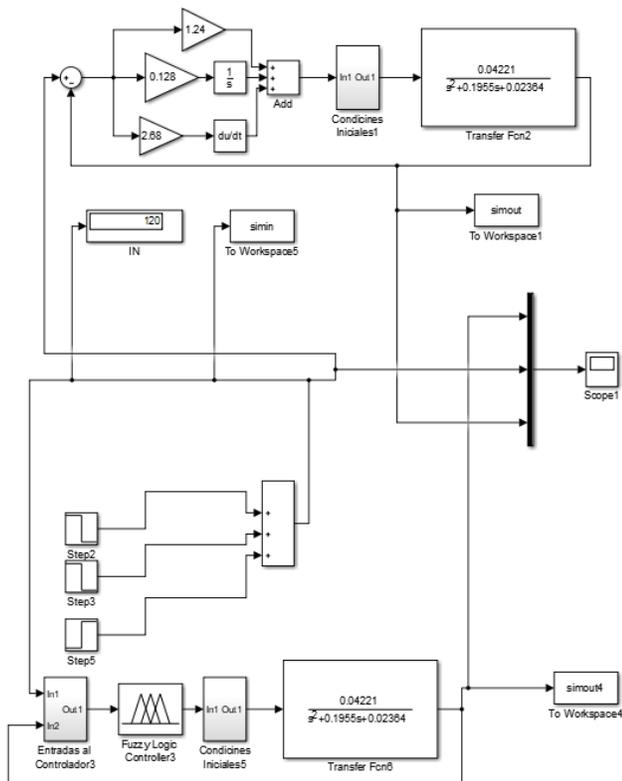


Fig. 4. Modelo de simulación del lazo cerrado de control para el sistema excitatriz del motor síncrono, control PID y difuso, utilizando Simulink Matlab®.

Utilizando la Toolbox de Matlab (ver Fig. 4) se obtiene el resultado del controlador difuso de tres reglas y el controlador de referencia PID. Para los dos casos se observa una respuesta estable (ver Fig. 5). Sin embargo, se puede notar que, para el caso de la respuesta del controlador difuso, este no logra seguir el comportamiento de la entrada de control, lo que sugiere un ajuste de la base de reglas establecida o una revisión de los conjuntos difusos que se definieron en el universo de discurso para las entradas y la salida.

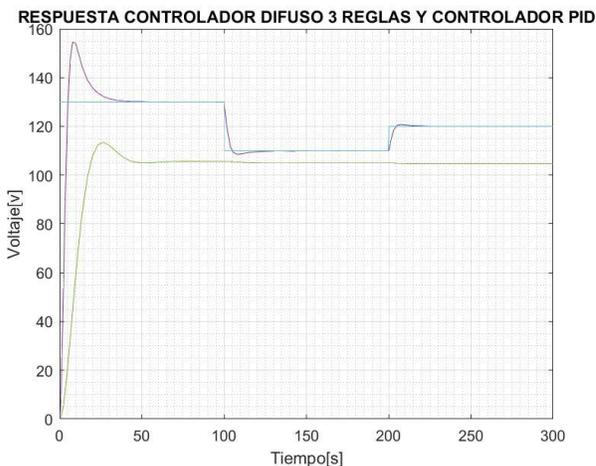


Fig. 5. Respuesta del controlador PID y difuso de tres reglas en el sistema excitatriz del motor síncrono.

En búsqueda de mejorar el comportamiento del controlador, se plantea el diseño de controladores difusos de cinco y siete reglas, los cuales logren contrarrestar el error presentado a partir de un ajuste de los conjuntos difusos y una base de reglas más robusta y así lograr una respuesta más asertiva.

#### A. Diseño del controlador de cinco reglas

Para el controlador tipo Fuzzy de cinco reglas al igual que en el controlador de tres reglas, se contemplan el error y la derivada del error como entradas del sistema y como salida se establece un valor de voltaje. Para el diseño de este controlador, se conservan como punto de partida los conjuntos difusos definidos en el controlador tres reglas y se contemplan de manera adicional los siguientes conjuntos difusos:

#### En la entrada “error”

- Medio Bajo (MB), es una función triangular definida como,

$$Medio\ Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq -2 \\ 1,862x + 3,724 & -2 < x < -1,463 \\ -1,63x - 1,38 & -1,463 < x < -0,85 \\ 0 & x \geq -0,85 \end{cases}$$

- Medio Alto (MA), es una función triangular definida como,

$$Medio\ Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,772 \\ 2,01x - 1,55 & 0,772 < x < 1,268 \\ -1,36x + 2,72 & 1,268 < x < 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

**En la salida “voltaje de salida”**

- MuyBajo (MB), es una función triangular definida como,

$$MuyBajo = \begin{cases} 0 & x \leq -0,03636 \\ -1,04x + 0,961 & -0,03636 < x < 0,9193 \\ 0 & x \geq 0,9193 \end{cases}$$

- MuyAlto (MA), es una función triangular definida como,

$$MuyAlto = \begin{cases} 0 & x \leq 4,12 \\ 1,13x - 4,68 & 4,12 < x < 5 \\ 0 & x \geq 5 \end{cases}$$

Esto permite contar con un universo de discurso que contempla un número mayor de posibilidades (ver Fig. 6) en la identificación de los grados de pertenencia, lo cual también se ve reflejado en la designación de la base de reglas.

En la tabla 2 se puede apreciar la base de reglas establecidas para el controlador difuso de cinco reglas que dentro de la investigación se consideró adecuado para el sistema excitatriz del motor síncrono.

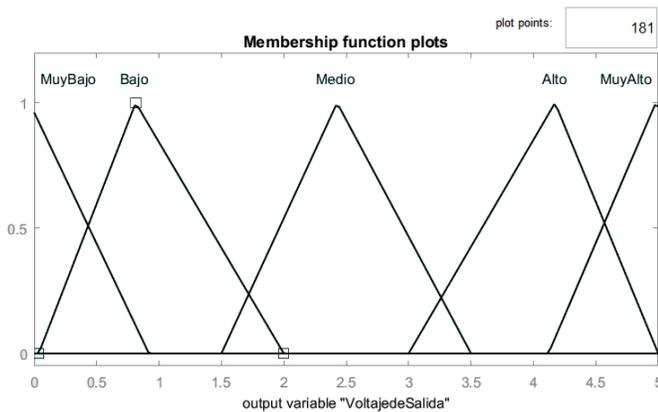


Fig. 6. Funciones de membresía de la variable de salida “voltaje de salida” utilizando Fuzzy Logic Designer, Matlab®.

TABLA II  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO DE CINCO REGLAS

	N	C	P
B	MB	MB	MB
MB	B	B	B
C	B	M	A
MA	M	A	MA
A	MA	MA	MA

Este controlador diseñado permite obtener una salida que logra el seguimiento de los valores establecidos en el PWM para la señal de control (ver Fig.7)

El controlador logra ajustarse al setpoint, sin embargo, se puede observar cómo se presentan algunos sobre picos al momento de presentarse los cambios para los diferentes valores de set point, lo cual puede deberse al ajuste de la base de reglas y en tiempo real, puede deberse a los protocolos de comunicación que se puedan emplear para la puesta en funcionamiento del controlador. [17]

Se ajustan diferentes controladores difusos de cinco reglas (ver Fig. 8) con la intención de identificar el que mejor responde en el control de la excitatriz de la maquina síncrona.

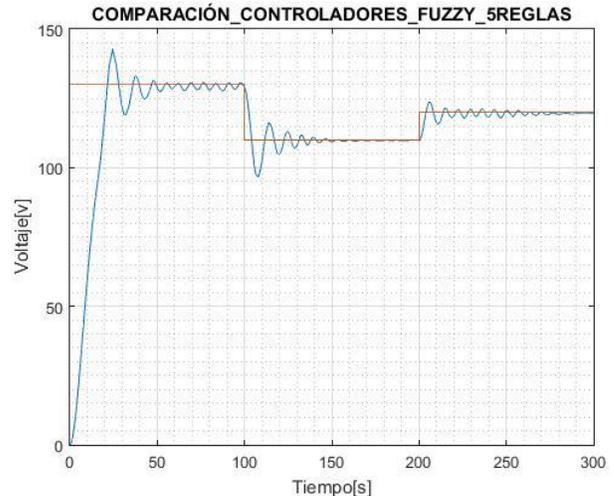


Fig. 7. Respuesta de velocidad del controlador Fuzzy de cinco Reglas.

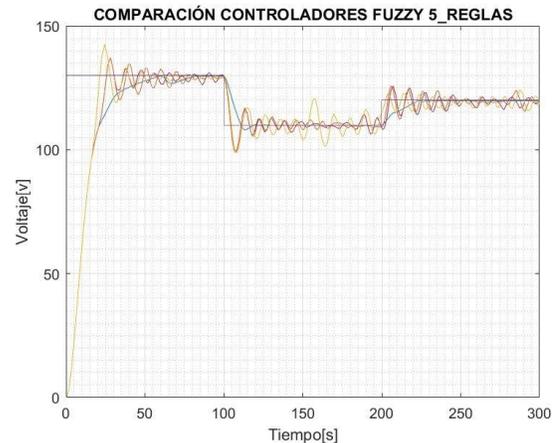


Fig. 8. Comparación respuesta de velocidad del controlador Fuzzy de cinco Reglas.

## B. Diseño del controlador de siete reglas

Teniendo en cuenta que la respuesta ofrecida por los diferentes controladores difusos de cinco reglas diseñados anteriormente, logran dar seguimiento a la señal de control, pero con sobre picos presentados en la salida de voltaje, se plantea diseñar controladores difusos de siete reglas que propendan la mejora en la señal de salida. [3]

Al igual que en el diseño de controladores difusos de cinco reglas, en busca de obtener un controlador que mejor se ajuste a la necesidad de control del sistema, se diseñan diferentes controladores difusos de siete reglas. Dentro de los controladores de siete reglas diseñados se resalta el controlador del cual se presenta a continuación la información de funciones de membresía para las entradas “error” y “derivada del error” y la salida “voltaje de salida”.

### Para la entrada “error”

- Muy Bajo (MuB), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Muy\ Bajo = \begin{cases} 1 & x \leq -6,83 \\ -0,20x - 0,385 & -6,83 < x < -1,9 \\ 0 & x \geq -1,9 \end{cases}$$

- Bajo (B), es una función triangular definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq -5 \\ 0,5x + 2,5 & -5 < x < -3 \\ -0,469x - 0,408 & -3 < x < -0,8701 \\ 0 & x \geq -0,8701 \end{cases}$$

- MedioBajo (MeB), es una función triangular definida como,

$$MedioBajo = \begin{cases} 0 & x \leq -2 \\ 1,021x + 2,042 & -2 < x < -1,021 \\ -1,102x - 0,125 & -1,021 < x < -0,114 \\ 0 & x \geq -0,114 \end{cases}$$

- Centro (C), es una función triangular definida como,

$$Centro = \begin{cases} 0 & x \leq -0,757 \\ 1,321x + 0,999 & -0,757 < x < 0 \\ -1,762x + 0,999 & 0 < x < 0,5675 \\ 0 & x \geq 0,5675 \end{cases}$$

- Medio Alto (MeA), es una función triangular definida como,

$$Medio\ Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,114 \\ 1,469x - 0,167 & 0,114 < x < 0,7945 \\ -0,829x + 1,658 & 0,7945 < x < 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

- Alto (A), es una función triangular definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,7945 \\ 0,453x - 0,359 & 0,7945 < x < 3 \\ -0,5x + 2,5 & 3 < x < 5 \\ 0 & x \geq 5 \end{cases}$$

- MuyAlto (MuA), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$MuyAlto = \begin{cases} 0 & x \leq 1,9 \\ 0,181x - 0,344 & 1,9 < x < 7,411 \\ 1 & x \geq 7,411 \end{cases}$$

### Para la entrada “derivada del error”

- Negativo (N), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Negativo = \begin{cases} 1 & x \leq -485,5 \\ -0,00214x - 0,0427 & -485,5 < x < -19,9 \\ 0 & x \geq -19,9 \end{cases}$$

- Medio Neg (MN), es una función triangular definida como,

$$Medio\ Neg = \begin{cases} 0 & x \leq -252 \\ 0,0088x + 2,2176 & -252 < x < -138,7 \\ -0,0072x & -138,7 < x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

- Cero (C), es una función triangular definida como,

$$Cero = \begin{cases} 0 & x \leq -126 \\ 0,0079x + 0,9954 & -126 < x < 0 \\ -0,0083x + 0,9943 & 0 < x < 119,8 \\ 0 & x \geq 119,8 \end{cases}$$

- Medio Pos (MP), es una función triangular definida como,

$$Medio\ Pos = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 0,00726x & 0 < x < 138,7 \\ -0,0098x + 2,369 & 138,7 < x < 240 \\ 0 & x \geq 240 \end{cases}$$

- Positivo (P), es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Positivo = \begin{cases} 0 & x \leq 19,9 \\ 0,002119x - 0,04216 & 19,9 < x < 491,8 \\ 1 & x \geq 491,8 \end{cases}$$

Contar con un número mayor de conjuntos difusos en las entradas y salidas del controlador, permite definir una mayor cantidad de alternativas, como se muestra en la tabla 3, las cuales proporcionan una respuesta concreta; sin embargo, esta respuesta contempla la variedad de combinaciones posibles entre las funciones de membresía. Esto conlleva a obtener un controlador de mayor robustez que proporciona una salida de control que para el caso particular del sistema excitatriz del motor síncrono, es adecuada.

En la figura 9 se puede apreciar la respuesta obtenida para los diferentes controladores difusos de siete reglas diseñados.

TABLA III  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO DE SIETE REGLAS

	N	MN	C	MP	P
MuB	MuB	MuB	MuB	MuB	MuB
B	B	B	B	B	B
MeB	B	B	B	MeB	MeB
C	MeB	M	M	M	MA
MeA	MA	MA	MA	A	A
A	A	A	A	A	A
MuA	MuA	MuA	MuA	MuA	MuA

En la tabla 3 se puede observar como las funciones de membrecía respecto del controlador tipo Fuzzy de cinco reglas involucra otros aspectos cualitativos de gran importancia para el comportamiento del error y de la derivada del error, ya que para reducir el sobresalto presentado en los cambios abruptos en el setpoint se hacía necesario contemplar más acciones que redujeran dicho error a partir del comportamiento del mismo.

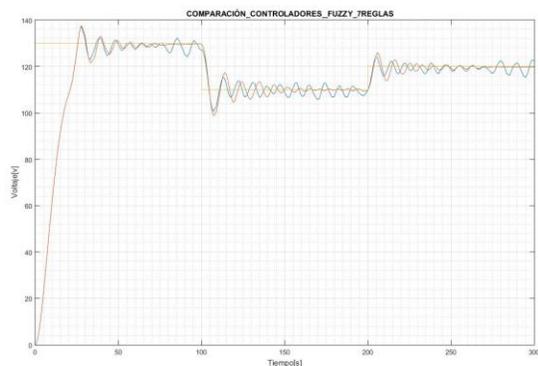


Fig. 9. Comparación respuesta de velocidad del controlador Fuzzy de siete Reglas.

Realizando un comparativo entre la respuesta obtenida entre los dos controladores se puede observar que para los dos casos se logra la estabilidad del sistema a partir de las condiciones de entrada aun cuando tras la excitación de la entrada de voltaje con la señal de control, se producen en cierto grado sobre picos en la señal de salida (ver Fig.10). Se puede apreciar que el controlador difuso de siete reglas se presenta de manera relativa una respuesta mejorada en comparación con los controladores difusos de tres y cinco reglas.

#### IV. CONCLUSIONES

La respuesta que se puede obtener tras el diseño de controladores difusos, permite estabilidad en el sistema. Se logra un comportamiento que en comparación con

controladores de tipo clásico como por ajuste de parámetros tipo Ziegler & Nichols, reacciona activamente ante cambios abruptos que se puedan presentar en la señal de entrada. Para el caso particular de la máquina síncrona de referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik, se pudo analizar como inicialmente tras la utilización de la DAQ NI USB 6009 se precisa la información para el modelado del sistema, que, tras la utilización de los controladores diseñados, se logra mantener una estabilidad y respuesta rápida ante la señal de voltaje utilizada como acción de control para la excitatriz del motor.

Por otra parte, cabe resaltar que, para los tres casos, los controladores difusos tres reglas, cinco reglas y siete reglas, se contemplan la magnitud y comportamiento propio del error y su derivada, lo que permite contar con una respuesta capaz de presentar estabilidad aun con la presentación de los sobre picos en la excitación por parte de la señal de entrada y las sobre elongaciones en estado estable; teniendo en cuenta que visto desde la proporción presentada en la respuesta, las sobre elongaciones no presentan un porcentaje mayor a 3%.

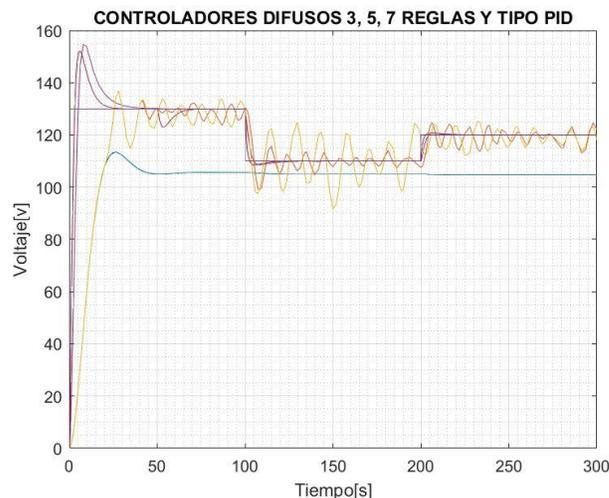


Fig. 10. Comparación entre las respuestas de los controladores difusos y el controlador clásico PID.

#### REFERENCIAS

- [1] González, H., Villamizar, O. (2019). Implementación de un sistema de control para regular la velocidad y posición de motores industriales utilizando el protocolo de comunicación OPC. *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 2, pp. 147-158.
- [2] Matute, A., Bernal, W. (2017). Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)* | Vol. III
- [3] Ogata, K. (2004). *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall, Cuarta edición, Madrid.
- [4] Moo, R., Medina, E., Romero, D. (2018). Controlador difuso tipo-2 para el control de velocidad de un motor de CD sujeto a un disturbio grande. *Computación y Sistemas*, Vol. 22, No. 2, 2018, pp. 521-536.
- [5] Farouk, N., Sheng, L. (2012). Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controller for Synchronous Generator. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*.

- [6] Santos P. M., Miranda S. (2012). Aplicación de la lógica difusa en el ámbito de las energías renovables. *Revista Elementos - Volumen 2. Número 1.*
- [7] Suarez, O. J., García, A. P., and Sanchez, E. N. (2016). Intelligent control for the exciter of a synchronous machine with closed loop voltage. In *2016 World Automation Congress (WAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Pérez, T., Blanco, E. (2017). Estrategias Pedagógicas en el aula de clase *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- [9] Guzmán, J., Durley, I., Álvarez J. F. (2014). Propuesta de un Generador de Aplicaciones Educativas Basadas en Televisión Digital Usando Arquitectura de Cómputo en la Nube. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- [10] Tolosa, C., Eugenio, B. (2017). Desarrollo de Libros Electrónicos: "Taller Pedagógico"," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257, 2017.
- [11] Samacá, L. F., Mesa, L. (2016). Investigación Formativa para Estudiantes de Ingeniería Utilizando Robótica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257.
- [12] Carreño, K., Gabriel, N. (n.d.). Tutorial para la Programación de las tarjetas NI-USB 6008/6009 con la toolbox de adquisición de datos de Matlab. Universidad Pontificia Bolivariana.
- [13] Ferrin, C., Magdalena, X., Loaiza, H. (2017). Sistema de extracción automática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante técnicas de visión por computador en un sistema embebido. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.* ISSN: 1692-7257.
- [14] Acevedo, S.A., Bautista, D.R. (2017). Análisis de una red en un entorno IPV6: una mirada desde las intrusiones de red y el modelo TCP/IP. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- [15] Lizarazo, J., Puentes, A., Vergara, M. (2018). System of acquisition of data for analysis of debalance in rotary machines. Sistema de adquisición de datos para análisis de desbalance en máquinas rotativas. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257.
- [16] Acevedo, S., Bautista, D. (2017). Analysis Of A Network In An Ipv6 Environment: A View From Network Intrusions And The Tcp / Ip Model. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257.
- [17] Romero, E., Martínez, G., Rico-Bautista, D. (2018) Minimum Path Tree: Routing, Approximate Algorithms And Complexity. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257, V 1, N 31.
- [18] González, Y., Peñaranda, M., Manzano, O. (2018). The Strategy Of Big Data As A Key Factor Of Competitiveness In Companies. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257, V1 – Número 31.