



SISTEMA DE CONTROL DE LA EXCITATRIZ DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA  
UTILIZADO LÓGICA DIFUSA Y REDES NEURONALES

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

*Facultad De Ingenierías Y Arquitectura*  
*MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES*

**DIEGO JOSÉ BARRERA OLIVEROS**

Ingeniero en Mecatrónica

Trabajo presentado para optar al título de Magister en Controles Industriales

Directores de Tesis

Ph.D. Aldo Pardo García

Ph.D. (C) Oscar Javier Suárez Sierra

Pamplona, Colombia  
2019

*A Dios, quien me permitió contar con la salud y la sabiduría  
para completar esta meta planteada en mi crecimiento profesional.*

*A mis padres José Aníbal y Trina Isabel, mis hermanos Jhon y Xiomara  
quienes han sido imagen a seguir en mi crecimiento personal y profesional.*

*Sin ellos mi esfuerzo y dedicación no hubiesen sido  
los mismos.*

*A mi director Aldo Pardo García  
y a mí co-director y amigo Oscar Javier Suárez,  
por su dedicación, su apoyo, su paciencia  
y tiempo dedicado en este proyecto.*

# *Agradecimientos*

*Un especial agradecimiento al M.Sc. Edison Caicedo por haber contribuido en gran medida a la ejecución de este proyecto con sus conocimientos y tiempo.*

*A mis colegas y amigos  
M.Sc. Diego Armando Mejía e Ing. Yara Angeline Oviedo  
que me brindaron acompañamiento durante este  
proyecto y de diversas maneras contribuyeron al  
desarrollo del mismo.*

*A mis amigos que día a día me  
recordaron la importancia de lograr esta meta  
y me hicieron caer en cuenta que contaba con lo necesario para lograrla.*

## RESUMEN

El presente proyecto trata del desarrollo del control para la excitatriz de un motor síncrono utilizando técnicas de control inteligente como lo son la lógica difusa y las redes neuronales. A excitatriz será manejada por una fuente de alimentación de tensión en corriente directa o continua (CD/CD) la cual por medio de una modulación por ancho de pulso (PWM) será controlada. Se utiliza una configuración Buck Síncrono de la mano de una red de Snubber como convertidor (CD/CD) para reducir los sobre impulsos dirigidos a la excitatriz al momento de transmitir un valor de tensión.

Los tipos de controladores inteligentes que se busca implementar son un controlador tipo Fuzzy 3, 5 y 7 reglas diseñado a partir de la data obtenida para el sistema motor-generator y redes neuronales que permitan clonar el comportamiento de la planta y/o el controlador, esto con el fin de establecer un comparativo entre la respuesta obtenida a partir de los dos controladores inteligentes mencionados y controladores diseñados previo a esta investigación.

Para la adquisición de la data del sistema motor-generator y como salida de control para la excitatriz del motor se utiliza una tarjeta de bajo costo de National Instruments con referencia DAQ NI USB-6009, la cual permite establecer fácilmente comunicación para envío y recepción de datos con el software Matlab® desde su editor de programas, Command Window y la Toolbox Simulink, lo cual a su vez da paso a la utilización de la herramienta Fuzzy del mismo software para realizar el control inteligente. Esta tarjeta logra el cierre del lazo cerrado de control con su canal de salida que da la acción a la etapa de control que por medio del micro controlador genera la modulación por ancho de pulso que da continuidad al proceso de control de la excitatriz para el motor síncrono.

La Acción de control se fundamenta en la variación de niveles de tensión que por medio de la tarjeta de adquisición de datos será guiados al micro controlador; el micro controlador contará con la respectiva programación que a partir del nivel de tensión recibido en sus terminales generará un proporcional de modulación por ancho de pulso.

***Palabras claves:*** Motor síncrono, control inteligente, excitatriz estática, inversores (CD/CD).

## ABSTRACT

The present project is about development of the control for the exciter of a synchronous motor using intelligent control techniques such as fuzzy logic and neural networks. The exciter will be driven by a direct or direct current (DC / DC) power supply which will be controlled by means of a pulse width modulation (PWM). A Synchronous Buck configuration is used in the hand of a Snubber network as a converter (DC / DC) to reduce over-impulses directed to the exciter when transmitting a voltage value.

The types of intelligent controllers that are to be implemented are a Fuzzy type 3, 5 and 7 controller designed based on the data obtained for the motor-generator system and neural networks that allow to clone the behavior of the plant or the controller, in order to establish a comparative the response obtained from the two aforementioned intelligent controllers and controllers designed prior to this investigation.

For the acquisition of the motor-generator system data and as a control output for the motor exciter, a low-cost card from National Instruments with reference DAQ NI USB-6009 is used, which allows to easily establish communication for sending and receiving data with the software Matlab® from its program editor, Command Window and the Simulink Toolbox, which in turn gives way to the use of the Fuzzy toolbox of the same software to perform intelligent control. This card achieves the closing of the closed control loop with its output channel that gives the action to the control stage that by means of the micro controller generates the pulse width modulation that gives continuity to the control process of the exciter for the motor synchronous

The control action is based on the variation of voltage levels that through the data acquisition card will be guided to the micro controller; the microcontroller will have the respective programming that from the voltage level received in its terminals will generate a proportional pulse width modulation.

**Keywords:** *Synchronous motor, intelligent control, static exciter, inverters (DC / DC).*

## TABLA DE CONTENIDO

### Contenido

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>11</b>
<i>INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>11</i>
I.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	12
II.   OBJETIVOS .....	13
A. <i>Objetivo general.....</i>	13
B. <i>Objetivos específicos .....</i>	13
III.  RESUMEN DE CAPÍTULOS .....	13
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>15</b>
<i>SISTEMAS ENERGÉTICOS Y.....</i>	<i>15</i>
<i>MÁQUINAS ELÉCTRICAS .....</i>	<i>15</i>
I.    LA ENERGÍA .....	15
A. <i>Tipos de energía.....</i>	15
B. <i>Generación de energía .....</i>	17
II.   MAQUINAS ELÉCTRICAS .....	18
A. <i>El Principio de Funcionamiento .....</i>	18
B. <i>Constitución general de una máquina eléctrica rotativa.....</i>	19
C. <i>Clasificación de las máquinas eléctricas .....</i>	20
III.  BUCK SÍNCRONO .....	21
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>28</b>
<i>DISEÑO Y ANÁLISIS DE.....</i>	<i>28</i>
<i>CONTROLADORES.....</i>	<i>28</i>
I.    CONTROL INTELIGENTE .....	28
A. <i>Control difuso.....</i>	29
II.   DISEÑO DE LOS CONTROLADORES TIPO FUZZY EN LA TOOLBOX DE MATLAB® .....	31
A. <i>Diseño del controlador tipo Fuzzy 5 reglas.....</i>	32
B. <i>Diseño del controlador tipo Fuzzy 7 reglas .....</i>	46
C. <i>Aplicación de redes neuronales en el sistema de control de la máquina síncrona.....</i>	61
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>68</b>

<i>COMPARATIVO CONTROLADORES</i> .....	68
<i>INTELIGENTES</i> .....	68
I.    TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6009.....	68
II.   COMPARACIÓN FUZZY 5 REGLAS VS FUZZY 7 REGLAS.....	72
CONCLUSIONES .....	82
REFERENCIAS .....	83

## LISTA DE FIGURA

Fig. 1. Constitución general de una maquina eléctrica rotativa .....	19
Fig. 10. Vista frontal y lateral del módulo convertidor CD/CD. ....	27
Fig. 11. Diagrama de control Fuzzy. ....	29
Fig. 12. Funciones de pertenencia. ....	29
Fig. 13. Base de reglas. ....	30
Fig. 14 Toolbox Fuzzy. MATLAB® .....	31
Fig. 15 Membresías de la variable de entrada “error” CASO 1. ....	32
Fig. 16 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” CASO 1 .....	33
Fig. 17 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” CASO 1 .....	34
Fig. 18 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1 .....	36
Fig. 19 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1 .....	37
Fig. 2. Conversión de energía por dispositivos electromecánicos.....	19
Fig. 20 Membresías de la variable de entrada “error” CASO 2. ....	37
Fig. 21 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” CASO 2.....	39
Fig. 22 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” CASO 2.....	40
Fig. 23 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 2. ....	41
Fig. 24 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 2 .....	42
Fig. 25 Sistema en lazo cerrado para la excitatriz del sistema motor generador.....	43
Fig. 26 Respuesta controladores tipo fuzzy 5 reglas CASO 1 y CASO 2.....	43
Fig. 27 Esquema comparativo controladores PID y Fuzzy 5 reglas.....	44
Fig. 28 Respuesta comparativo controladores simulados PID y Fuzzy 5 reglas .....	45
Fig. 29 Membresías de la variable de entrada “error” Fuzzy 7R CASO 1 .....	45
Fig. 3. Circuito diseñado para el acondicionamiento con los transistores Mosfet IRF640N. ....	22
Fig. 30 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” Fuzzy 7R CASO1 .....	47
Fig. 31 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” Fuzzy 7R CASO1 .....	49
Fig. 32 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 7 CASO1 .....	51
Fig. 33 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 7 reglas CASO 1 .....	51
Fig. 34 Membresías de la variable de entrada “error” Fuzzy 7R CASO 2.....	52
Fig. 35 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” Fuzzy 7R CASO2 .....	54
Fig. 36 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” Fuzzy 7R CASO2 .....	55
Fig. 37 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 7 CASO2.....	57
Fig. 38 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 7 reglas CASO 2 .....	58
Fig. 39 Comparación entre controladores fuzzy 7 reglas .....	59
Fig. 4. Convertidor .....	23
Fig. 40 Comparación entre controladores fuzzy 7 reglas CASO1 y CASO2.....	59
Fig. 41 Estructura de una neurona.....	60
Fig. 42 Diagrama de bloques para toma de datos de entrada y salida de la planta (excitatriz máquina síncrona).....	61
Fig. 43 Entrenamiento de la red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona.....	62

Fig. 44 Red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona) .....	63
Fig. 45 Respuesta de la red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona).....	63
Fig. 46 Diagrama de bloques para toma de datos de la planta con retardos.....	64
Fig. 47 Diagrama de bloques del sistema con red neuronal con retardos .....	64
Fig. 48 Diagrama de bloques con la red neuronal vs controlador PID (excitatriz máquina síncrona) .....	65
Fig. 49 Respuestas del controlador PID y de una red neuronal en el control de la excitatriz de la máquina síncrona. ....	66
Fig. 5. Distribución de entradas y salidas del modulo convertidor. ....	23
Fig. 50 Respuestas del controlador PID y de una red neuronal en el control de la excitatriz de la máquina síncrona .....	66
Fig. 51 Respuestas del controlador neuronal y controlador fuzzy 5 reglas CASO2 .....	67
Fig. 52 Respuestas de un segundo controlador neuronal y controlador fuzzy 5 reglas CASO2 .....	67
Fig. 53 Terminal análogo NI USB 6009 .....	69
Fig. 54 Terminal digital NI USB 6009 .....	69
Fig. 55 Canales análogos utilizados de la NI USB 6009 para envío y recepción de datos de la máquina síncrona .....	70
Fig. 56. Respuesta de la excitatriz de la máquina síncrona ante una entrada de control tipo escalón .....	71
Fig. 57. Respuesta del controlador PID y difuso 3 reglas en el sistema excitatriz del motor síncrono. ....	72
Fig. 58. Comparación entre las respuestas de los controladores difusos y el controlador clásico PID.....	76
Fig. 59. Configuración de la salida del a tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.....	76
Fig. 6. Controlador. ....	24
Fig. 60. Configuración de la entrada del a tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.....	77
Fig. 61. Esquema utilizado para la implementación de los controladores.....	77
Fig. 62. Sistema máquina síncrona y convertidor DC/DC.....	78
Fig. 63. Respuesta del controlador tipo fuzzy 3 reglas en tiempo real.....	78
Fig. 64. Respuesta del controlador tipo fuzzy 5 reglas en tiempo real.....	79
Fig. 65. Respuesta del controlador tipo fuzzy 7 reglas en tiempo real.....	79
Fig. 66. Implementación de la red neuronal para el control de la excitatriz de la máquina síncrona.....	80
Fig. 67. Respuesta de la red neuronal en tiempo real .....	80
Fig. 68. Respuesta de los controladores tipo fuzzy 3, 5 y 7 reglas.....	81
Fig. 7. Señal de salida de impulsos del controlador .....	25
Fig. 8. Señal de salida del microcontrolador PIC18F452.....	26
Fig. 9. Redistribución del módulo convertidor CD/CD. ....	26

## LISTA DE TABLAS

TABLA I: BOBINAS UTILIZADAS POR LOS DEVANADOS INDUCTOR E INDUCIDO DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA.....	21
TABLA II: BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 5 REGLAS CASO 1.....	37
TABLA III: BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 5 REGLAS CASO 2.....	43
TABLA IV: BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 7 REGLAS CASO 1.....	53
TABLA V: BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 7 REGLAS CASO 2.....	59
TABLA VI: BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 3 REGLAS.....	75

# CAPÍTULO I

## *INTRODUCCIÓN*

A medida que se busca la mejora en el desempeño de las máquinas eléctricas para diversas aplicaciones, una de las características influyentes se ve reflejada en la electrónica de potencia asociada al control de velocidad y posicionamiento. Como solución al control de velocidad de motores se emplean estrategias dentro de las cuales se encuentran las técnicas de control inteligente como la lógica difusa y las redes neuronales, que basadas en sistemas expertos que describen el sistema y de la mano de un análisis lógico facilitan la toma de decisiones para determinar la acción de control adecuada.

Las técnicas de control inteligente de la mano de la tecnología que facilita y permite implementar dichas técnicas, contribuye en gran medida al perfeccionamiento de instrumentos que facilitan labores en diversos campos dentro de los cuales una gran beneficiada es la industria. Una característica importante de este tipo de técnicas inteligentes de control es que pueden ser implementadas en máquinas eléctricas como lo son los motores de corriente directa (CD) los cuales tienen gran cabida en la industria en procesos en donde se requieren amplias variaciones de velocidad con larga vida útil, destacando la flexibilidad para implementar algoritmos tipo Mamdani y Takagi Sugeno con la microelectrónica y la electrónica de potencia adecuada. [1]

El presente proyecto consiste en implementar un módulo que permita empalmar el sistema de motor generador con el software Matlab de tal modo que se pueda ejercer control en la excitatriz del motor síncrono referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik, que es considerado en este trabajo, el cual representa una máquina eléctrica síncrona que requiere de una entrada en la excitatriz de tensión en CD lo que a su vez es un beneficio para la implementación de convertidores debido a que permite la variación de tensión CD de la entrada con una rápida respuesta dinámica.

Con el objetivo de lograr lo propuesto en primera instancia se plantean inicialmente varios controladores tipo Fuzzy 5 y 7 reglas que establecen características específicas para sus funciones de membresía a partir de lo que se considera como posible estados y grado de pertenencia a los mismos para el error y la derivada del error del sistema; para set point de la excitatriz el motor síncrono.

Por otra parte, las redes neuronales que buscan emular el comportamiento respecto de la toma de decisiones biológica han sido altamente utilizadas en el control de diversos tipos de motores, previendo una identificación de sistemas con bajo margen de error y acción de control que bien podría asimilarse a otros que puedan ser utilizados para este tipo de máquinas eléctricas o incluso ofrecer una mejor respuesta dependiendo de la red que sea utilizadas para el caso específico del sistema que se esté buscando controlar.

En vista del amplio campo de acción de esta técnica inteligente de control se plantea el diseño e implementación de una red neuronal [2], que pueda ser utilizada el sistema excitatriz de la máquina síncrona, de modo que contribuya en el control como objetivo de esta investigación, evidenciando su acción a partir de la configuración que sea más apropiada.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se puede apreciar el aprovechamiento de las máquinas eléctricas en aplicaciones a nivel industrial; sin embargo, con la automatización industrial, se hace necesario ejercer control, con el fin de obtener un comportamiento que poco a poco sea el esperado, obteniendo una respuesta con disminución del error, es decir, con un error que tienda a cero, que en otras palabras representa el obtener un producto o un resultado que tiende a contar con las características propias del producto esperado.

Al ejercer control en una maquina eléctrica como lo es un motor síncrono, se puede lograr un aprovechamiento de la misma y se puede ofrecer una reducción de costos de consumo y mantenimiento, a partir de la implementación de técnicas de control que utilizan los parámetros y las variables asociadas a la máquina.

Si bien, este tipo de máquinas pueden ofrecer una reducción en el consumo energético, se hace necesario como finalidad de la automatización, ejercer control para incrementar el beneficio ofrecido. Como alternativa de control existen técnicas inteligentes que emulan el razonamiento humano, al mismo tiempo que se adquiere información proveniente del sistema a controlar, lo que permite anticipar el comportamiento de la planta y así poder ejercer una acción correctiva que logre un comportamiento a la salida según sea requerido.

Implementar un control inteligente tipo Fuzzy 7 reglas y redes neuronales, permitirá analizar la estabilidad del sistema excitatriz, así como comparar con otros controladores de tipo clásico como PID o tipo fuzzy 3 y 5 reglas de menor robustez para poder definir los beneficios arrojados por el controlador en la reducción del consumo energético de la máquina, además del aporte de la aplicación de estas técnicas, para la rama investigativa en el campo de las máquinas eléctricas y su enlace con el control de procesos industriales, como parte fundamental de la automatización industrial.

## II. OBJETIVOS

### A. *Objetivo general*

- Desarrollar un sistema de control de la excitatriz de una máquina síncrona utilizando lógica difusa y redes neuronales.

### B. *Objetivos específicos*

- Diseñar el controlador inteligente tipo Fuzzy de 7 reglas para el sistema excitatriz de la máquina síncrona.
- Construir una red neuronal para el control de la excitatriz de la máquina síncrona.
- Comparar el comportamiento del controlador tipo Fuzzy de 7 reglas y la red neuronal, con un controlador clásico y tipo Fuzzy de 3 y 5 reglas.

Este proyecto contará con el siguiente personal investigador:

- Ing. En Mecatrónica: Diego José Barrera (**Investigador principal**)
- PhD Complejos eléctricos y electrotécnicos: Aldo Pardo García (**Tutor**)
- M.Sc. Controles Industriales: Oscar Javier Suarez Sierra (**Tutor**)

Se realizarán los estudios, análisis y pruebas pertinentes para llegar a un resultado que cumpla con los objetivos del proyecto y del cual se obtenga una conclusión a nivel de investigación con el fin de promover los procesos de investigación por parte del personal universitario en el campo de la automatización industrial y el control de máquinas eléctricas.

## III. RESUMEN DE CAPÍTULOS

El contenido de la tesis se desarrolla de la siguiente manera:

- **Capítulo II:** Este capítulo aborda lo relacionado con los conceptos básicos de sistemas energéticos y máquinas eléctricas; se induce a las características principales de la máquina síncrona utilizada para el desarrollo de esta investigación. Se explica de manera breve y concisa la forma en cómo se implementa el convertidor (DC/DC) para ejercer control en la máquina síncrona con la configuración Buck-Síncrono tomando como referencia trabajos previos realizados en el control de esta máquina.

Se evidencia la construcción del módulo que contiene la etapa de potencia para la implementación del control que se explica en un posterior capítulo.

- **Capítulo III:** Inicialmente se presenta un breve repaso de conceptos fundamentales del control inteligente, técnicas de control inteligente que son aplicados para el control de máquinas eléctricas, controladores tipo Fuzzy, redes neuronales. Este capítulo se enfoca en presentar el diseño de los controladores que posteriormente son implementados, esto hace referencia a los controladores Fuzzy 3 reglas (utilizado como referencia de comparación), 5 y 7 reglas. Se plantea el diseño de redes neuronales con el propósito de establecer un sistema de control híbrido; esto parte del diseño de redes neuronales clásicas utilizadas en la clonación del comportamiento de la máquina síncrona y redes neuronales para el control del sistema excitatriz de la misma. Se realiza un comparativo importante a nivel de simulación de los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) clásico, tipo Fuzzy 3, 5 y 7 reglas y del sistema neuro-difuso diseñado.
- **Capítulo IV:** Este capítulo muestra la función de la DAQ NI USB 6009 para la adquisición de datos y el envío de la señal de control a partir de la técnica utilizada para cada caso utilizando Matlab® como herramienta computacional para el desarrollo de los controladores. Resultados en la implementación real de los controladores diseñados tipo Fuzzy 5 y 7 reglas y la Red Neuronal. Comparativo entre la implementación real de los controladores diseñados tipo Fuzzy 5 y 7 reglas y la Red Neuronal Diferencial. La comparación entre estos controladores mencionado tendrá lugar tomando como referencia la implementación de los controladores PID clásico, tipo fuzzy 3 reglas como controlador difuso con el mínimo de reglas y un controlador tipo fuzzy 5 reglas resultado de un trabajo previo y punto de referencia de esta investigación.

# CAPÍTULO II

## *SISTEMAS ENERGÉTICOS Y*

## *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*

**L**as máquinas eléctricas representan a nivel industrial, un elemento que adquiere por si solo un papel importante en la transformación de energía, ya sea como motores, transformadores o generadores [3], lo cual en la actualidad vincula estas máquinas en aplicaciones de mantenimiento de instalaciones industriales, seguridad, control de procesos. Es importante resaltar que la energía eléctrica es fundamental para el desarrollo industrial y ya que las máquinas eléctricas cuentan con un papel importante en tal área, se hace necesario implementar estrategias que permitan ejercer control sobre estas y así lograr el mayor aprovechamiento de la energía. [3], [4]

### I. LA ENERGÍA

Podemos definir la Energía como la capacidad que tienen los cuerpos para cambiar o para producir cambios. Esta energía se manifiesta de múltiples formas, si es en forma de calor se denomina Calorífica, si es en forma de luz, luminosa y si es en forma de electricidad, eléctrica. Hay muchos tipos de energía, pero podemos destacar la solar, la atómica o nuclear, la hidráulica, la química, la eléctrica, la cólica, la mecánica y la térmica.

Según lo planteado en el principio de conservación de energía, esta no puede ser destruida, sin embargo, la energía puede ser generada, conservada o transmitida de un punto u objeto a otro de diferentes maneras [5], La energía no se crea ni se destruye, se transforma. Todas las transformaciones de energía que existen se desprenden de sí partiendo de las dos formas básicas en la que esta se manifiesta.

#### *A. Tipos de energía*

*Tipos de Energía según su forma:* Todas las energías producto de transformaciones son sustraídas de dos grandes formas de energía primarias, las cuales se clasifican en:

- **Energía Cinética:** es la que posee cualquier objeto que se encuentra en movimiento, por lo que también se conoce como energía de movimiento. La energía cinética depende de la velocidad y de la masa del objeto, por lo que puede calcularse con la siguiente fórmula:
- **Energía Potencial:** depende de la posición del objeto y puede dividirse en tres subtipos: La energía potencial gravitatoria, que depende de la altura del objeto y tiene que ver con la gravedad a la que estamos sometidos todos los cuerpos y objetos de la Tierra. Energía potencial elástica, que poseen aquellos materiales que son elásticos, es decir, que tienen la capacidad de estirarse o deformarse de su posición inicial pero que también tienen la capacidad de recuperar su forma original. Energía potencial eléctrica, que tiene una carga eléctrica cuando la situamos en un campo eléctrico. Como depende de la posición de la carga dentro del campo se habla de energía potencial. Las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas y estas generan a su alrededor una zona (que se conoce como campo eléctrico) en la cual, si introducimos otra carga eléctrica, afectará a la primera.

*Energía según sus fuentes:* Según el origen de donde sean obtenidas y dependiendo de la limitación o no de sus recursos, en nuestro planeta tenemos a disposición diferentes fuentes de energías renovables o no. [6]

*Energías renovables:* Las fuentes y tipos de energía renovable estarían formados principalmente por:

- **Energía solar.** La radiación solar se puede aprovechar para producir electricidad o calor. Se trata de *energía solar fotovoltaica* cuando la radiación solar que incide en unos módulos diseñados para tal fin genera energía eléctrica por efecto fotovoltaico. Se trata de *energía solar térmica* cuando se utiliza la radiación solar directa concentrada para el calentamiento de un fluido.
- **Energía hidráulica.** Si el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura se deja caer hasta un nivel inferior, esta energía se convierte en energía cinética y, posteriormente, mediante una central hidroeléctrica, se transforma en electricidad.
- **Energía del mar.** El mar también puede ser utilizado como fuente de energía para producir electricidad. Cuando se aprovecha el movimiento de las olas, se denomina *energía undimotriz*, cuando se aprovechan las mareas es energía. También se pueden aprovechar las corrientes marinas, la térmica oceánica y de ósmosis para generar energía.
- **Energía eólica.** Es la energía cinética contenida en las masas de aire en la atmósfera. A través de los ‘molinos de viento’ estratégicamente ubicados a lo largo de la geografía española, es posible transformar esta energía en electricidad.

- **Biomasa.** La materia orgánica también puede aprovecharse como fuente de energía. Existen varias materias orgánicas que se pueden aprovechar como biomasa, por lo que se trata de una fuente de energía muy heterogénea.
- **Geotermia.** Bajo la superficie de la Tierra existe un gran volumen de energía en forma de calor que puede aprovecharse tanto para producir energía eléctrica (en yacimientos de alta temperatura, superiores a 100-150 grados centígrados) o energía térmica.

“Entre las ventajas de los tipos de energía renovable destaca que no contaminan y son respetuosas con el medio ambiente, por lo que también se denominan “energías limpias”. Son más seguras para la salud de las personas ya que no generan residuos y son fáciles de desmantelar. Tienen un potencial prácticamente ilimitado para producir energía ya que se generan a partir de fuentes ‘inagotables’ como el sol, el viento, el movimiento del agua, etc. Contribuyen a crear puestos de trabajo en un nuevo sector, y su impacto económico es especialmente positivo para la región en la que se instala”. [7]

*Energías no renovables:* Se consideran energías de origen no renovable:

El petróleo. Este líquido viscoso de color verde, amarillo, marrón o negro está constituido por distintos hidrocarburos (compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno en cantidades variables). La formación del petróleo comenzó hace millones de años, cuando la Tierra era un planeta cubierto de agua. Con el paso del tiempo, los procesos geológicos y la acción bacteriana sobre la materia orgánica acumulada en el fondo del mar dio lugar a esta mezcla de hidrocarburos. El gas natural. Esta fuente de energía fósil consiste en una mezcla de hidrocarburos. Al igual que el petróleo, su existencia se debe a la acción bacteriana de miles de años bajo tierra. El carbón. Roca formada por carbono y otras sustancias. En el año 1990 suministraba más del 27% de la energía comercial de todo el mundo. La energía nuclear de fisión se obtiene al bombardear, con neutrones a gran velocidad, los átomos de ciertas sustancias. La sustancia más usada es el uranio-235, aunque también se usan el uranio-233 y el plutonio-239.

*Tipos de energía según manifestaciones:*

Dentro de las más importante en relación a esta investigación, se relacionan la energía eléctrica que es la generada por el movimiento de partículas o electrones tanto positivos como negativos. Una vez que la energía eléctrica abandona su fuente, se transforma instantáneamente en otra forma de energía diferente. La electricidad es el flujo de energía eléctrica o carga, que es tanto una parte básica de la naturaleza como una de las formas de energía comúnmente más utilizada. La Energía mecánica que se debe a la posición y movimiento de un cuerpo y es la suma de la energía potencial, cinética y energía elástica de un cuerpo en movimiento. Refleja la capacidad que tienen los cuerpos con masa de hacer un trabajo. Algunos ejemplos de energía mecánica los podríamos encontrar en la energía hidráulica, eólica y mareomotriz.

*B. Generación de energía*

La energía eléctrica es un recurso energético indispensable y, en muchos casos, insustituible para el desarrollo de múltiples actividades y funciones en el campo industrial, comercial y residencial. En el sector residencial la energía eléctrica es fuente de comodidad en los hogares; impulsa las actividades cotidianas; proporciona seguridad, bienestar y confort; en aplicaciones domésticas de iluminación, cocción, calentamiento de agua, ventilación, refrigeración, calefacción y recreación, en el sector no residencial, la energía eléctrica es fuente de productividad y competitividad en los mercados; soporta procesos de producción industrial de toda índole; así como infraestructura comercial y de servicios: hornos, maquinaria, herramientas, iluminación, equipo electrónico, acondicionamiento de aire, enfriamiento, seguridad, entre otros.

Colombia es uno de los países cuya generación de energía es más competitiva. Sin embargo, es cara, y las renovables tienen gran potencial. Según la última comparativa mundial Global Energy Competitiveness 2015, ocuparía el noveno puesto entre 144 naciones, por detrás de países de primera línea como Suiza, Noruega, Francia, Nueva Zelanda, España, Suecia, Dinamarca y Austria, y por delante de Portugal, Costa Rica y Reino Unido. El estudio evalúa el desarrollo económico del país, en conjunto con su sostenibilidad, y la seguridad en el acceso a la energía y figurar entre los diez primeros países del mundo (y ser el primero de Latinoamérica) es desde luego un muy buen dato.

El informe valora muy positivamente la seguridad del mercado energético colombiano, lo que se debe a reformas aplicadas sobre todo en la última década, que han convertido al país en un punto muy atractivo para los inversionistas extranjeros.

## II. MAQUINAS ELÉCTRICAS

En el hogar y talleres pequeños, la mayoría de los aparatos que usamos diariamente se encuentran contruidos con motores de inducción monofásicos de C.A. (Corriente Alterna) como por ejemplo las lavadoras, refrigeradores, aires lavados, abanicos de pedestal, bombas, relojes etc. Es por esto la gran importancia que tienen estos motores en nuestra vida diaria.

### A. *El Principio de Funcionamiento*

Este principio señala que todas las máquinas eléctricas son reversibles, es decir, pueden actuar tanto como generador como motor. Esta es una de sus ventajas que permite, por ejemplo, que una máquina eléctrica que usualmente trabaja como motor pueda, en un momento dado, actuar como freno. Para ello basta con que pase a funcionar como generador transformando la energía cinética del sistema en energía eléctrica que, además, puede recuperarse devolviéndola a la red. Cuando una máquina trabaja como motor transforma energía eléctrica en mecánica. Por consiguiente, debe generar una fuerza contra electromotriz, opuesta a la tensión de red, para así captar energía eléctrica y originar un par motor en su eje.[8]

## B. Constitución general de una máquina eléctrica rotativa

Una máquina eléctrica rotativa consta básicamente de dos partes: estator y rotor. (El estator es la parte fija de la máquina y tiene forma de cilindro hueco. El rotor se coloca en el interior del estator y es la parte móvil. Entre el estator y el rotor existe una holgura denominada entrehierro, la cual impide que ambas partes rocen entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa. En el rotor de la máquina se encuentra un núcleo magnético, bien cilíndrico o bien de polos salientes, sobre el que se coloca el devanado, bobinado o arrollamiento del rotor. En la carcasa se coloca la caja de bornes donde se realizan las conexiones eléctricas de la máquina con el exterior (ver Fig. 1). También se coloca sobre la carcasa la denominada placa de características, que es una placa impresa donde se indican los datos más importantes de la máquina. [9], [10]

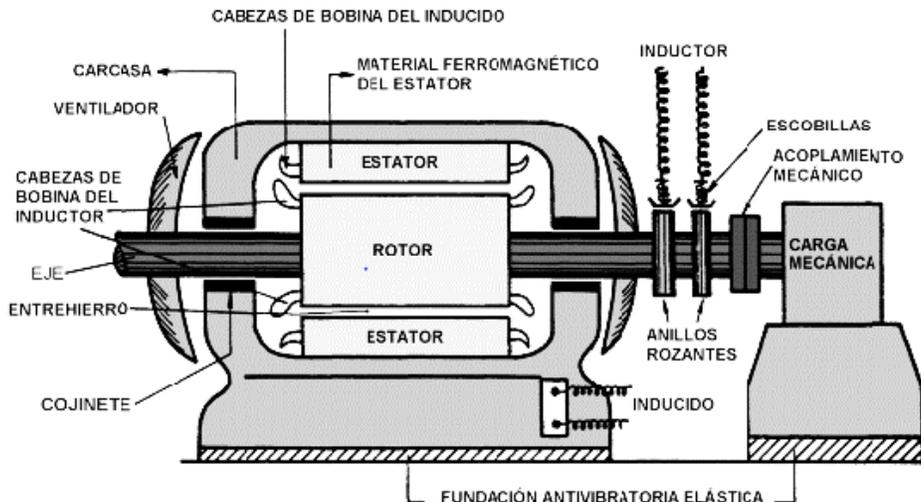


Fig. 1. Constitución general de una máquina eléctrica rotativa

Muchos dispositivos pueden convertir energía eléctrica a mecánica y viceversa. La estructura de estos dispositivos puede ser diferente, dependiendo de las funciones que realicen. Algunos dispositivos son usados para conversión continua de energía, y son conocidos como motores y generadores. Otros dispositivos pueden ser: actuadores, tales como solenoides, relés y electro magnetos. Todos ellos son física y estructuralmente diferentes, pero operan con principios similares [9]. Un dispositivo electromecánico de conversión de energía es esencialmente un medio de transferencia entre un lado de entrada y uno de salida (ver Fig. 2). En el caso de un motor, la entrada es la energía eléctrica, suministrada por una fuente de poder y la salida es energía mecánica enviada a la carga, la cual puede ser una bomba, ventilador, etc.

El generador eléctrico convierte la energía mecánica por una máquina prima (turbina) a energía eléctrica en el lado de la salida. La mayoría de estos dispositivos pueden funcionar, tanto como motor, como generador.

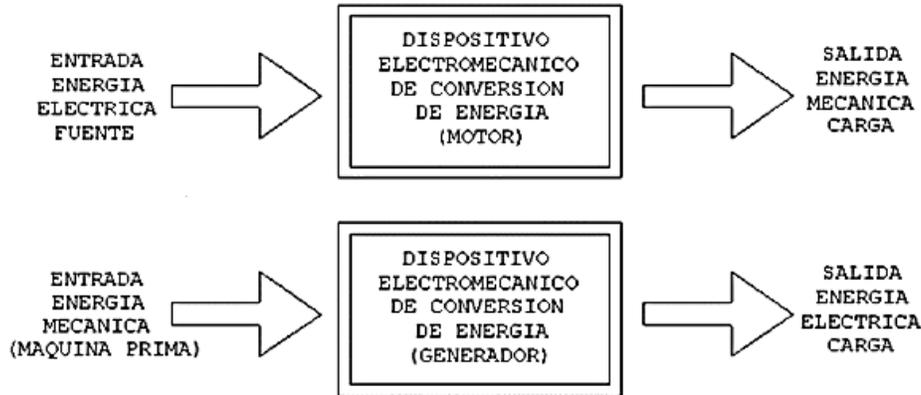


Fig. 2. Conversión de energía por dispositivos electromecánicos

### C. Clasificación de las máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas se pueden clasificar en estáticas y móviles y de acuerdo con el tipo de corriente que pasa por sus devanados. En el caso de las máquinas móviles, estas pueden ser de C.A. o de C.C. (Corriente continua); sin embargo, en el caso particular de las máquinas de C.A., estas pueden ser excitadas con C.C. o C.A. Como resultado de la excitación con C.C. de una máquina de C.A. se puede apreciar una máquina síncrona que funcionan a una velocidad síncrona proporcional a la frecuencia de corriente alterna.

#### *Máquinas síncronas.*

Los motores síncronos funcionan a una velocidad síncrona fija proporcional a la frecuencia de la corriente alterna aplicada. Su construcción es semejante a la de los alternadores. Cuando un motor síncrono funciona a potencia constante y sobreexcitado, la corriente absorbida por éste presenta, respecto a la tensión aplicada un ángulo de desfase en avance que aumenta con la corriente de excitación. Esta propiedad es la que ha mantenido la utilización del motor síncrono en el campo industrial, pese a ser el motor de inducción más simple, más económico y de cómodo arranque, ya que con un motor síncrono se puede compensar un bajo factor de potencia en la instalación al suministrar aquél la corriente reactiva, de igual manera que un condensador conectado a la red.[11]

El principal inconveniente que presenta los motores síncronos, es que necesitan una C.C. para la excitación de las bobinas del rotor, pero en grandes instalaciones (Siderúrgicas), el avance de corriente que produce el motor síncrono compensa parcialmente el retraso que determinan los motores asíncronos, mejorando con ello el factor de potencia general de la instalación, es decir, el motor produce sobre la red el mismo efecto que un banco de condensadores, el mismo aprovechamiento de esta propiedad, es la mayor

ventaja del motor sincrónico. En la tabla 1 se puede apreciar el tipo de bobinas que se utilizan para el inductor y el inducido de una máquina síncrona.

TABLA I  
BOBINAS UTILIZADAS POR LOS DEVANADOS INDUCTOR E INDUCIDO DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

<b>MÁQUINAS SÍNCRONAS</b>			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Rotor	0 Hz (corriente continua)	a) Bobinas en ranuras (Rotor cilíndrico) b) Bobinas polares (Polos salientes)
Inducido	Estator	50 ó 60 Hz	Bobinas en ranuras

En este proyecto de investigación se utiliza una máquina síncrona de referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik que como se mencionaba anteriormente por ser un motor de tipo sincrónico, requiere de una excitación de tipo C.C. como parte de su funcionamiento. Es importante resaltar que requerir la excitación de tipo C.C. también facilita el ejercer control en la máquina síncrona; sin embargo, esto requiere implementar un circuito de acondicionamiento que permita suministrar a la máquina el valor estimado de C.C. para la excitatriz, proveniente de un controlador.

Para que el controlador realice la toma de decisiones también requerirá de la instrumentación electrónica mínima para poder interpretar el valor de la salida del motor en funcionamiento y así tomar este dato como retroalimentación en el lazo de control.

Como alternativa a lo mencionado anteriormente en relación a los circuitos de acondicionamiento, fue diseñado un sistema Buck Síncrono.

### III. BUCK SÍNCRONO

El Buck es un convertidor CD/CD reductor, es decir el voltaje de salida es inferior al voltaje de entrada; el Buck convencional que funciona como convertidor que reemplaza el diodo de marcha libre realiza la función del diodo de marcha libre, pero con reducción de pérdidas. El circuito trabaja en dos estados, en los cuales la idea principal de la conmutación es obtener una señal directa inferior a la salida con leves variaciones de tensión y corriente. [12], [13]

Para el diseño del Buck se calcula el valor adecuado del inductor y del capacitor en función de la tensión de entrada, tensión de salida, frecuencia de conmutación y el rizado máximo permisible. [14]

El rizado del voltaje está determinado por la ecuación 1, en ella es posible realizar el cálculo de la capacitancia con los criterios establecidos para determinar el valor de la inductancia. [12], [14]

$$\Delta V_c = \frac{V_{out}(V_{in}-V_{out})}{8CLf^2V_{in}} = \frac{\Delta I}{8Cf} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta I$  = Variación de la corriente

$V_{in}$  = Tensión de entrada o fuente

$f$  = Frecuencia de conmutación

$V_{out}$  = Tensión de salida

$L$  = Inductancia

$\Delta V_c$  = Variación de la tensión de salida o de capacitor

$C$  = Capacitancia

La implementación implica calcular y obtener los componentes del Buck, principalmente, crear una modulación PWM de frecuencia relativamente alta, cálculo de la inductancia L y la capacitancia C del Buck, selección de los interruptores S1 y S2, crear un aislamiento entre la etapa de control y potencia, garantizar el accionamiento de los interruptores S1 y S2. Lo cual da como resultado circuito Buck Síncrono (ver Fig. 3) requerido para la implementación de controladores, para el caso particular relacionado por Suárez el controlador Fuzzy 5 reglas con modulación PWM programada en PIC18F452, a una frecuencia de 45KHz. [14]

El Buck diseñado e implementado cuenta con las características que se muestran a continuación para un transistor tipo Mosfet IRF640N:

$$L = \frac{V_{out}(V_{in}-V_{out})}{fLV_{in}} = \frac{80V(100V-80V)}{0.2A \times 45000Hz \times 100V} = 1.77mH \quad (2)$$

$$C = \frac{\Delta I}{8\Delta V_c f} = \frac{0.2A}{8 \times (2 \times 10^{-3}V) \times 45000Hz} = 277.77\mu F \quad (3)$$

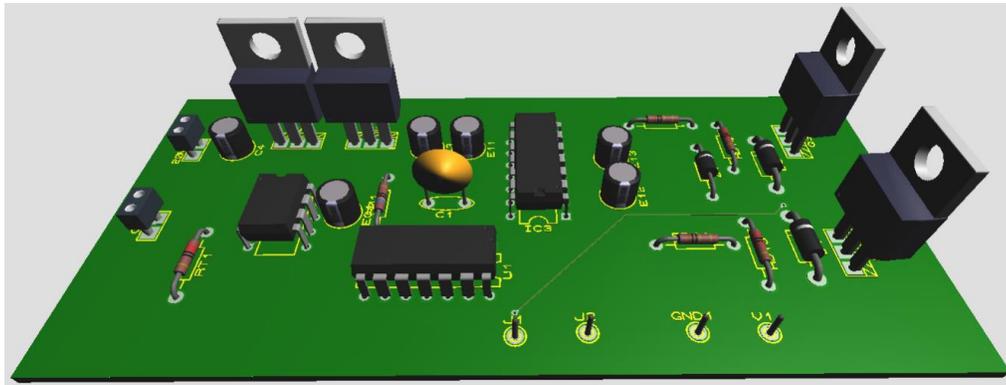


Fig. 3. Circuito diseñado para el acondicionamiento con los transistores Mosfet IRF640N.

Finalmente, el circuito de acondicionamiento, se acopla con Una Red de SNUBBER para contrarrestar los sobre picos generados con el Buck en las múltiples conmutaciones requeridas para acción de control a implementar formando el vínculo con el micro controlador, conformando el convertidor (microcontrolador, los Mosfets, el circuito de acondicionamiento, la Red de SNUBBER, y el capacitor e inductor) necesario para la implementación de controladores en el caso particular del control de la excitatriz de la máquina síncrona. referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik (ver Fig. 4).

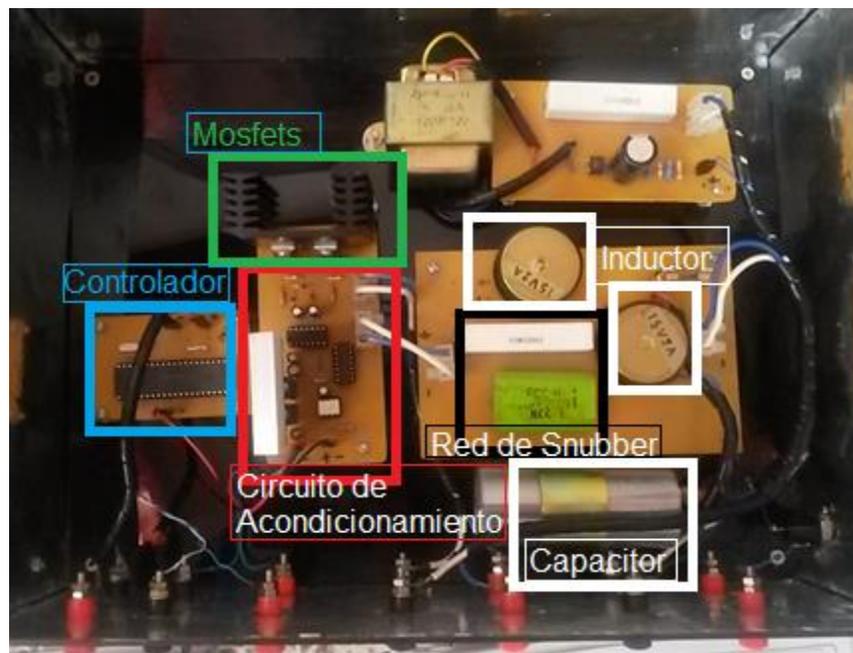


Fig. 4. Convertidor

El convertidor el cual cuenta con 4 entradas y 1 salida (ver Fig. 5) cuenta con la distribución de entradas y salidas como se relaciona a continuación.



Fig. 5. Distribución de entradas y salidas del módulo convertidor.

- Entrada análoga de control en el rango de 0 a 5V que determina tiempo del ciclo de trabajo del convertidor a través del microcontrolador.
- Entrada de 5V de CD de alimentación del microcontrolador.
- Entrada de 15V de CD para el cicuito de acondicionamiento que exita los Mosfets.
- Entrada de 100V de CD para la fuente principal del convertidor a través de los Mosfets.
- La salida es la tesión en DC convertidor Buck síncrono.

Tras la implementación del módulo, se puede obtener el comportamiento de la planta, en donde el sistema que se requiere en lazo abierto previo al diseño de los controladores, estará comprendido por una señal en C.D. manipulada para emular la señal de control y la señal sensada por el convertidor C.D., que indica el seguimiento a la señal de control.

Una de las pruebas principales en la verificación del funcionamiento del módulo relaciona la modulación por ancho de pulso de los pulsos que se crean utilizando el microcontrolador para realizar la acción de control mencionada.

Para la implementación del microcontrolador que para el caso específico de este proyecto es el en PIC18F452 se diseña inicialmente un circuito básico con oscilador [14], que reciba la señal de alimentación y un valor de C.D. entre 0 y 5 v para producir un PWM (modulación por ancho de pulso) que interactúe con el circuito de acondicionamiento compuesto por los Mosfet IRF640N (ver Fig. 6)

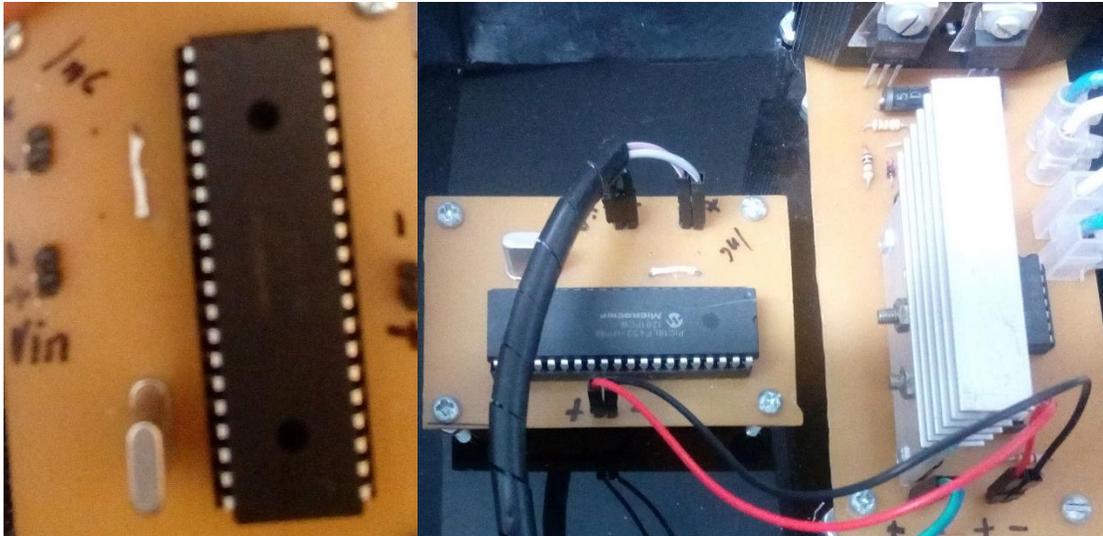


Fig. 6. Controlador.

En conjunto el circuito controlador y el circuito de acondicionamiento permiten aprovechar los disparos de conmutación de los Mosfet para ejercer acción de control, proporcionales a los PWM generados por el microcontrolador (ver Fig. 7).



Fig. 7. Señal de salida de impulsos del controlador.

Como se puede observar en la figura 7, los pulsos son generados, pero en relación a la conexión con los demás dispositivos eléctricos que componen el modulo, estos no presentan el comportamiento requerido y en los valores críticos de la señal de control presentados en los umbrales alto y bajo, el microcontrolador pierde efecto.

En busca de mejorar la respuesta ofrecida por esta primera etapa de funcionamiento del módulo, se complementa el circuito para el microcontrolador de modo que se elimine el ruido eléctrico presentado.

De igual forma se reformula el código a implementar proporcionando un mejor manejo de los umbrales de tensión de entrada para el microcontrolador y una salida de señal cuadrada que no pierde efectividad en los umbrales de tensión ni antes cambios abruptos de la señal de entrada, estando en conexión directa con los demás dispositivos electrónicos del módulo convertidor (ver Fig.8).

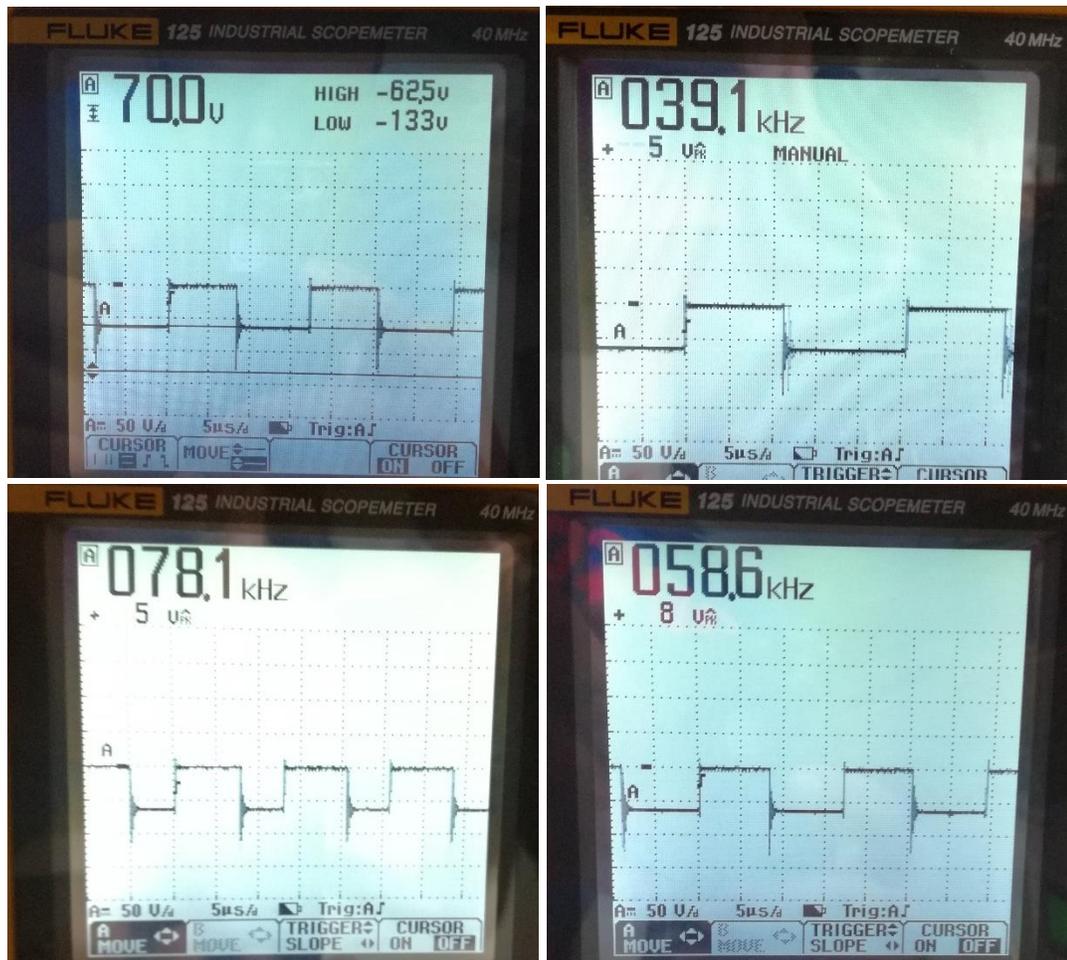


Fig. 8. Señal de salida del microcontrolador PIC18F452.

Finalmente se realiza un re distribución de las placas electrónicas contenidas en el módulo convertidor (ver Fig. 9), en pro del aprovechamiento del espacio en el prototipo y mejora en el funcionamiento del mismo. Se aísla la etapa de control de los demás elementos del módulo (ver Fig. 10).

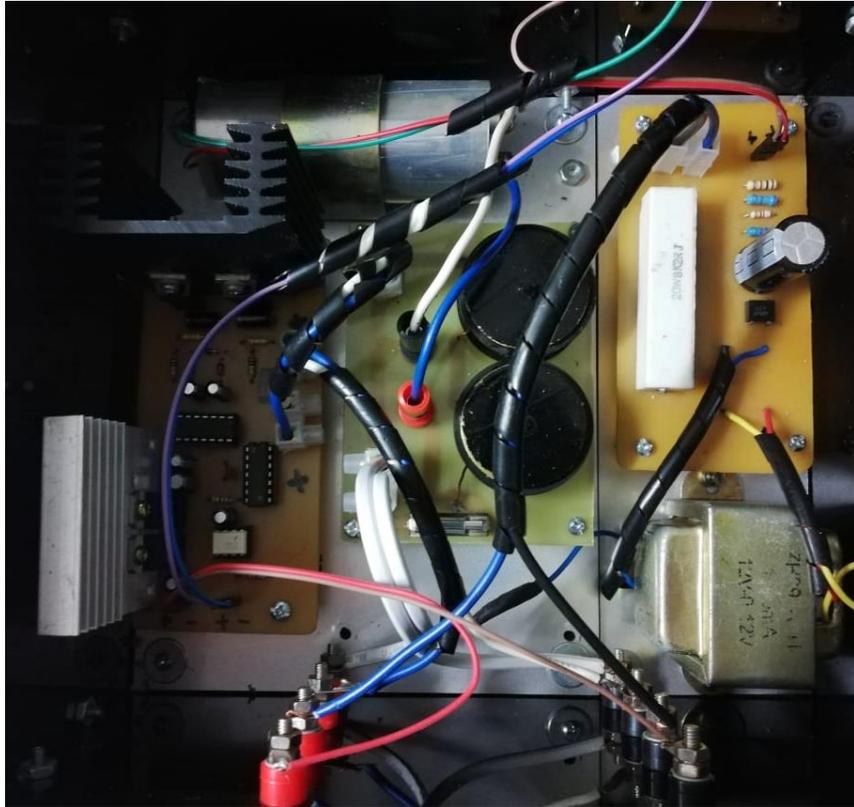


Fig. 9. Redistribución del módulo convertidor CD/CD.



Fig. 10. Vista frontal y lateral del módulo convertidor CD/CD.

# CAPÍTULO III

## *DISEÑO Y ANÁLISIS DE CONTROLADORES*

**I**mplementar controladores automáticos representa un avance en el campo ingenieril, en donde cabe resaltar la importancia del papel que juegan en la mejora continua de los procesos que son llevados a cabo por, por ejemplo, máquinas herramienta utilizadas en manufactura, diseño de máquinas, sistemas robóticos, entre otros, [15] ejercer control sobre una actividad, proceso o procedimiento, permite obtener en mayor medida un comportamiento deseado, ya sea que se cuente con información de salida del sistema como retroalimentación formado un lazo cerrado de control o bien si se emplea o no información del comportamiento de sistema para ejercer un control automático, semiautomático o manual en un lazo abierto o cerrado de control.

El control de sistemas que como menciona [15], inició de manera significativa con el “regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII.”, en la actualidad se puede implementar utilizando métodos inteligentes basados en diversas técnicas de control que permiten según los parámetros de diseño, obtener una respuesta controlada con características favorables de estabilidad, reducción del error en estado estacionario, robustez ante perturbaciones, entre otras, a partir de especificaciones del usuario en paralelo con el conocimiento del comportamiento de la planta.

### I. CONTROL INTELIGENTE

El control inteligente nace como alternativa para el control de diversos procesos, basándose en la aplicación de técnicas inteligentes que buscan optimizar la respuesta del sistema, arrojando valores de salida que cuentan con una disminución del error respecto de los parámetros ingresados o “setpoint”; esto se logra al emular la toma de decisiones humanas provenientes de un experto en el proceso o actividad que se busca controlar. [16]

Como ejemplos del control inteligente, se encuentran el control difuso que permite establecer un conjunto de reglas para la toma de decisiones denotando las variables de entrada y salida como variables que se pueden expresar de modo cualitativo, estableciendo rangos según cree conveniente el experto a partir de un análisis del comportamiento de cada una de las variables involucradas; el conjunto de reglas sincroniza las entradas y salidas y según el

método a aplicar. Se establece una matemática de conjuntos para arrojar un valor de salida para los actuadores y así controlar el sistema. [16]

También existen métodos inteligentes de control como las redes neuronales, los algoritmos genéticos, redes de Petri, entre otros, que se fundamentan en el aprendizaje del sistema a medida que este retroalimenta información, donde existen diversas vías y el sistema selecciona los caminos a seguir a partir del comportamiento que obtuvo previamente a la salida, en busca de una nueva combinación de soluciones que en conjunto logren en cada interacción una mejor respuesta.

Es de gran importancia resaltar que la selección del método a utilizar depende directamente del proceso a controlar, en otras palabras, depende del comportamiento de las variables involucradas, del funcionamiento de los dispositivos de entrada y salida y de la expectativa establecida para la salida del sistema; de ahí que todos los métodos se consideran excelentes, pero no viables para todo proceso, así mismo pueden ser considerarse necesarios, justos o redundantes según el proceso estudiado. [16]

#### *A. Control difuso*

La lógica difusa es muy utilizada en sistemas de control con el manejo de interpretaciones de variables según la persona que establece lo que en este sistema se conoce como funciones de transferencia, como lo explica Oviedo en su trabajo “Diseño de Sistemas Avanzados de Control. Control Fuzzy”. La lógica difusa busca expresar las etapas o el comportamiento de las variables de entrada y salida, con el uso de afirmaciones ambiguas expresadas con palabras, por ejemplo, describir la temperatura como “caliente” en donde el término “caliente” se presenta en un rango de valores que es definido por el observador; debido a que cada afirmación cuenta con un rango de valores, se pueden presentar que en la misma variable un estado coincida con varias afirmaciones, por lo cual se manejan grados de pertenencia a cada una de las afirmaciones y para poder establecer un valor más estricto de cada variable se utiliza la matemática de conjuntos.

El enlace entre las entradas y las salidas del sistema se realiza por medio de una base de reglas, que condiciona las posibles afirmaciones de la salida con la interacción entre las afirmaciones de las entradas según crea conveniente el observador o el experto, quien entiende la manera en que se comporta el sistema bajo diferentes condiciones, de modo tal que puede definir los parámetros bajo los cuales el sistema se comporta de manera adecuada a partir de un diagrama ordenado de los componentes del sistema difuso (Fig.11). [17], [18]

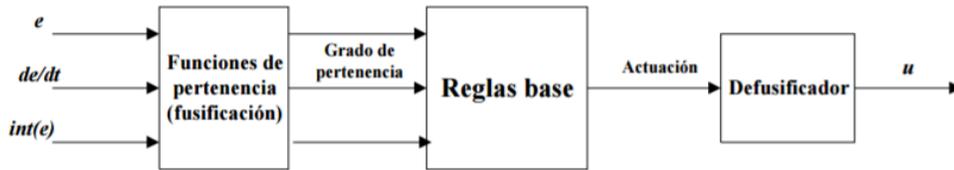


Fig. 11. Diagrama de control Fuzzy.

Las afirmaciones mencionadas anteriormente definen a la variable y también son conocidas como funciones de membrecía o funciones de pertenencia (ver Fig. 12), en el momento en que la variable toma un valor, este interactúa con los conjuntos que muestran el comportamiento de cada una de las funciones de pertenencia con el fin de identificar el grado de pertenencia, como se muestra en la figura 12. [17], [23]

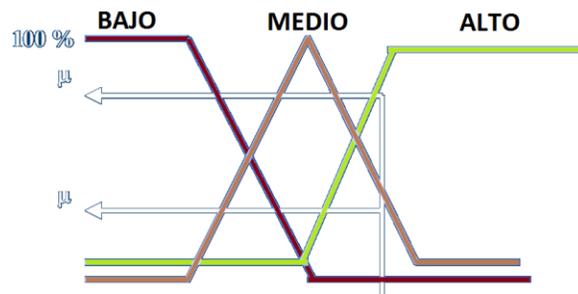


Fig. 12. Funciones de pertenencia.

La base de reglas como se mencionó anteriormente, enlaza las funciones de pertenencia de cada variable de entrada y el grado de pertenencia de las mismas, para llegar a un valor de la salida según matemática de conjuntos, que puede ser interpretada para estabilizar el sistema según el valor del set Point requerido en el control del proceso (ver Fig. 13).

<b>SI</b>	<b>(el error es grande);</b>
<b>Y</b>	<b>(su derivada pequeña y positiva)</b>
<b>ENTONCES</b>	<b>(el control será grande y positivo)</b>
<b>SI</b>	<b>(el error es nulo);</b>
<b>Y</b>	<b>(su derivada pequeña y negativa)</b>
<b>ENTONCES</b>	<b>(el control será pequeño y positivo)</b>

Fig. 13. Base de reglas.

En este proyecto se realiza una comparación entre dos controladores tipo Fuzzy; un controlador Fuzzy 5 reglas y un controlador Fuzzy 7 reglas. Para la implementación de los controladores mencionados, inicialmente se realiza el previo diseño y simulación del controlador, tarea a la cual se le da solución con la utilización de la herramienta computacional Matlab®.

## II. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES TIPO FUZZY EN LA TOOLBOX DE MATLAB®

El software MATLAB que permite dar solución a diferente tipo de necesidades de carácter matemático, a nivel de simulación y/o implementación de diferentes técnicas y aplicaciones según sea requerido; para el caso específico de la realización de este proyecto, ofrece Toolbox que colaboran en lo ya antes mencionado para el diseño de controladores clásicos, controladores tipo Fuzzy, redes neuronales, entre otros. Específicamente para el diseño de controladores difusos, MATLAB cuenta con la Toolbox “Fuzzy Logic” que facilita y de modo didáctico permite el ingreso de los parámetros requeridos para el diseño del controlador:

- Número de entradas
- Número de salidas
- Funciones de membrecía de las entradas
- Funciones de membrecía de las salidas
- Método de inferencia
- Rangos y tipos de funciones de membrecía

La Toolbox Fuzzy Logic (ver Fig. 14), permite configurar los parámetros para el controlador difuso mencionados anteriormente y por defecto se establece MAMDANI como método de inferencia.

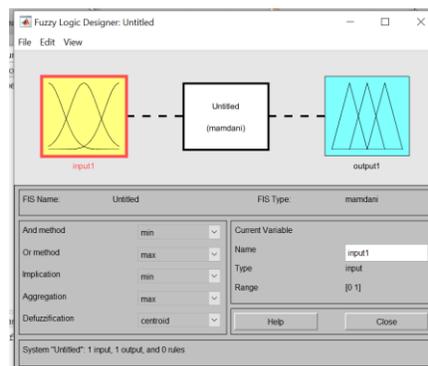


Fig. 14 Toolbox Fuzzy. MATLAB®

El método de inferencia MAMDANI consiste en:

Este método propuesto por Ebrahim Mamdani consiste principalmente en la fuzzificación de las variables de entrada del sistema, evaluación de las reglas que son establecidas en el diseño del controlador, inclusión de las salidas de las reglas y una defuzzificación; en donde se utilizan un conjunto de reglas difusas “SI- ENTONCES” y son tomados los valores de las entradas y son analizados cada uno de los antecedentes que se comparan en función de operadores lógicos con la intención de identificar un único resultado de la evaluación establecer un resultado en la salida. Finalmente, al resultado de la evaluación de los antecedentes teniendo en cuenta el conjunto de reglas definido se le aplica método para encontrar un resultado más preciso. [19]- [23]

Para el controlador tipo Fuzzy 5 reglas se establece lo siguiente: Se definen el error y la derivada del error como las dos entradas del sistema para dar como resultado una salida “voltaje de salida” en relación a la excitatriz del motor síncrono utilizando Mamdani como método de inferencia.

#### A. Diseño del controlador tipo Fuzzy 5 reglas

Para el controlador tipo Fuzzy 5 reglas se plantean 4 posibles controladores a partir del ajuste de las reglas para cada caso, a continuación, se especifican las funciones de membresía de entradas y salida para 2 de los casos en mención.

#### CONTROLADOR FUZZY 5 REGLAS. 1 CASO:

Se describe la variable de entrada “error” con su universo de discurso entre -15 y 15 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 15)

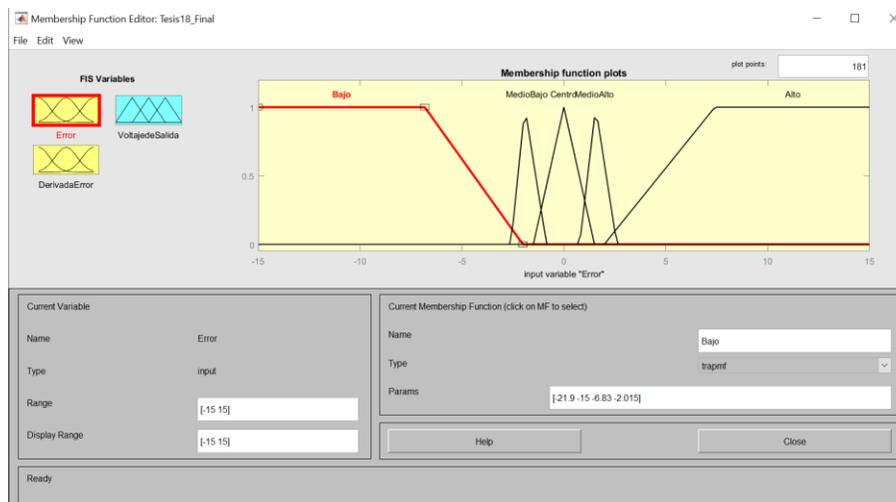


Fig. 15 Membresías de la variable de entrada “error” CASO 1.

- Bajo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 1 & x \leq -6,83 \\ \frac{-2,015 - x}{4,815} & -6,83 < x < -2,015 \\ 0 & x \geq -2,015 \end{cases}$$

- Medio Bajo, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq -2,6 \\ 1,466x + 3,8116 & -2,6 < x < -1,918 \\ -0,93x - 0,7905 & -1,918 < x < -0,85 \\ 0 & x \geq -0,85 \end{cases}$$

- Centro, es una función triangular definida como,

$$Centro = \begin{cases} 0 & x \leq -2,6 \\ 0,666x + 0,999 & -1,5 < x < 0 \\ -0,666x + 0,999 & 0 < x < 1,5 \\ 0 & x \geq -0,85 \end{cases}$$

- Medio Alto, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,772 \\ 1,269x - 0,979 & 0,772 < x < 1,56 \\ -0,9615x + 2,499 & 1,56 < x < 2,6 \\ 0 & x \geq 2,6 \end{cases}$$

- Alto, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 1,98 \\ 0,184x - 0,364 & 1,98 < x < 7,411 \\ 1 & x \geq 7,411 \end{cases}$$

Se describe la variable de entrada “DerivadaError” con su universo de discurso entre -2500 y 2500 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 16).

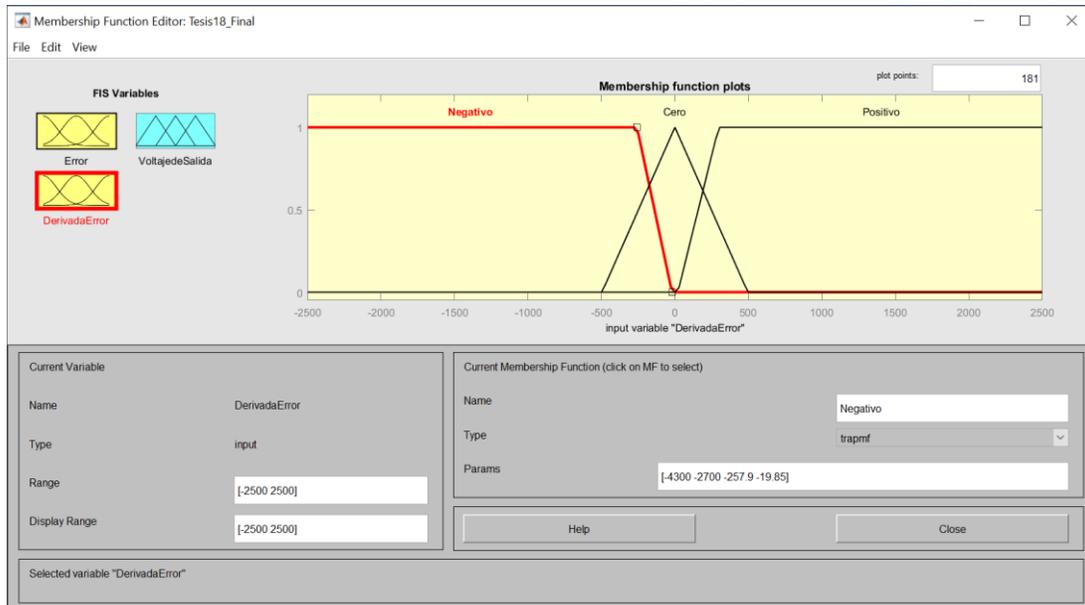


Fig. 16 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” CASO 1.

- Negativo, 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, 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, es una función semi-trapezoidal definida como,

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

Se describe la variable de salida “VoltajedeSalida” con su universo de discurso entre 0 y 5 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 17).



Fig. 17 Membresías de la variable de salida “VoltajeSalida” CASO 1.

- MuyBajo, es una función triangular definida como,

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

- Bajo, 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, 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, es una función triangular definida como,

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

- MuyAlto, es una función triangular definida como,

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

La base de reglas que se muestra en la tabla 2 se establece utilizando la herramienta Toolbox de Matlab, en ella se fijan las relaciones lógicas entre las variables lingüísticas entre las variables de entrada y salida (ver Fig. 18)

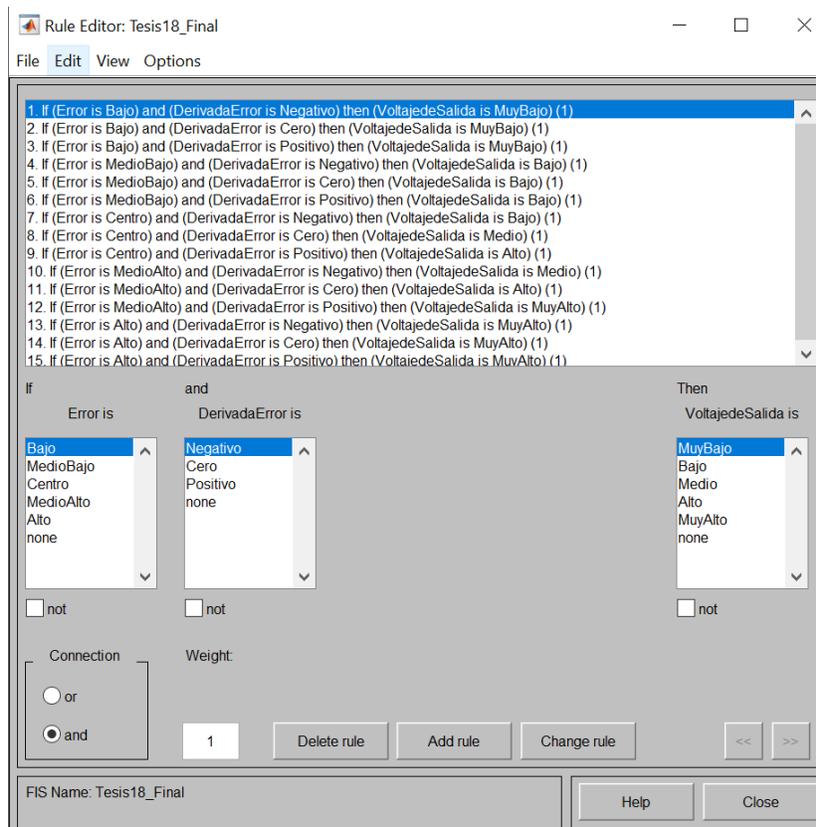


Fig. 18 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1.

TABLA II  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 5 REGLAS CASO 1

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

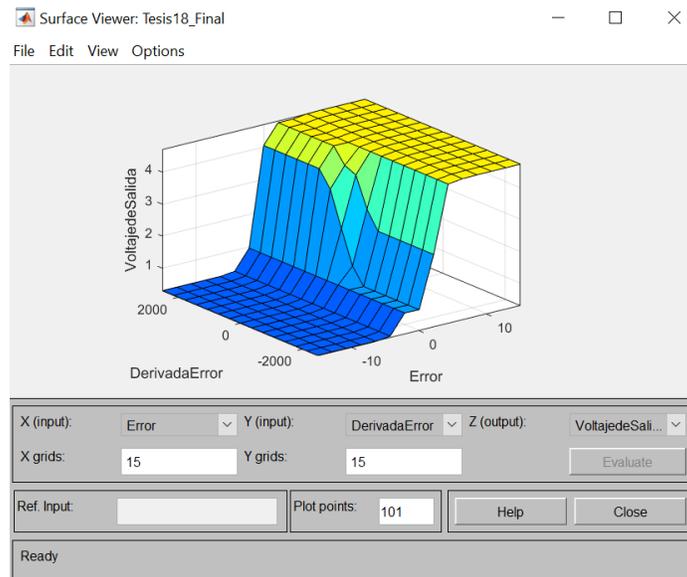


Fig. 19 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1

**CONTROLADOR FUZZY 5 REGLAS. 2 CASO:**

Se describe la variable de entrada “error” con su universo de discurso entre -15 y 15 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 20).

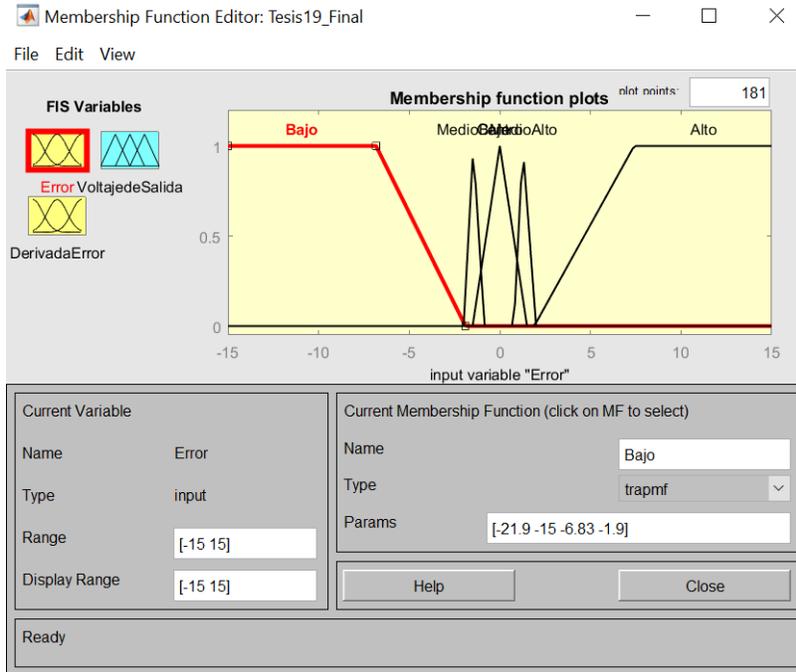


Fig. 20 Membresías de la variable de entrada “error” CASO 2.

- Bajo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 1 & x \leq -6,83 \\ -0,20x - 0.385 & -6,83 < x < -1,9 \\ 0 & x \geq -1,9 \end{cases}$$

- Medio Bajo, es una función triangular definida como,

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

- Centro, es una función triangular definida como,

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

- Medio Alto, es una función triangular definida como,

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

- Alto, es una función semi-trapezoidal definida como,

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

Se describe la variable de entrada “DerivadaError” con su universo de discurso entre -2500 y 2500 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 21).

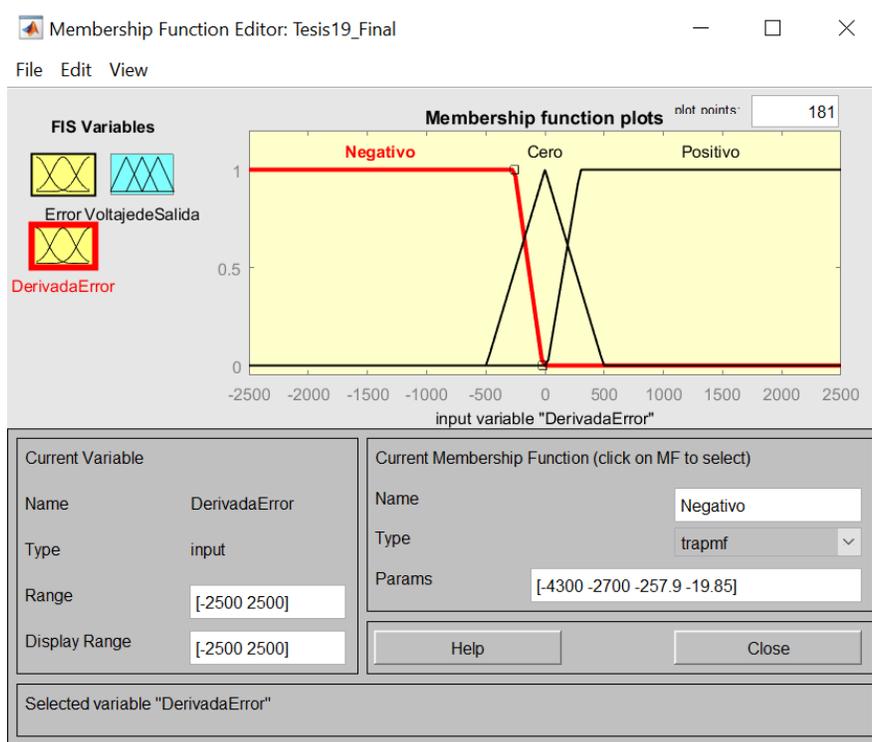


Fig. 21 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” CASO 2.

- Negativo, 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, 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, es una función semi-trapezoidal definida como,

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

Se describe la variable de salida “VoltajedeSalida” con su universo de discurso entre 0 y 5 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 22)

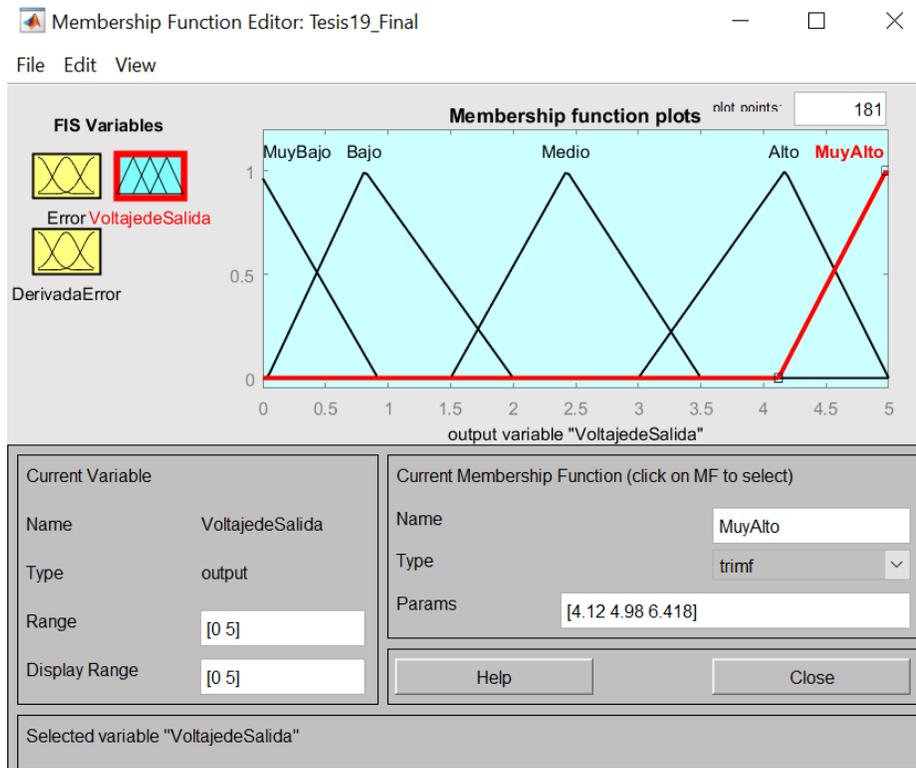


Fig. 22 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” CASO 2.

- MuyBajo, es una función triangular definida como,

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

- Bajo, 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, 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, es una función triangular definida como,

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

- MuyAlto, es una función triangular definida como,

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

La base de reglas establecida (ver Fig. 23) para CASO 2 se muestra en la tabla 3.

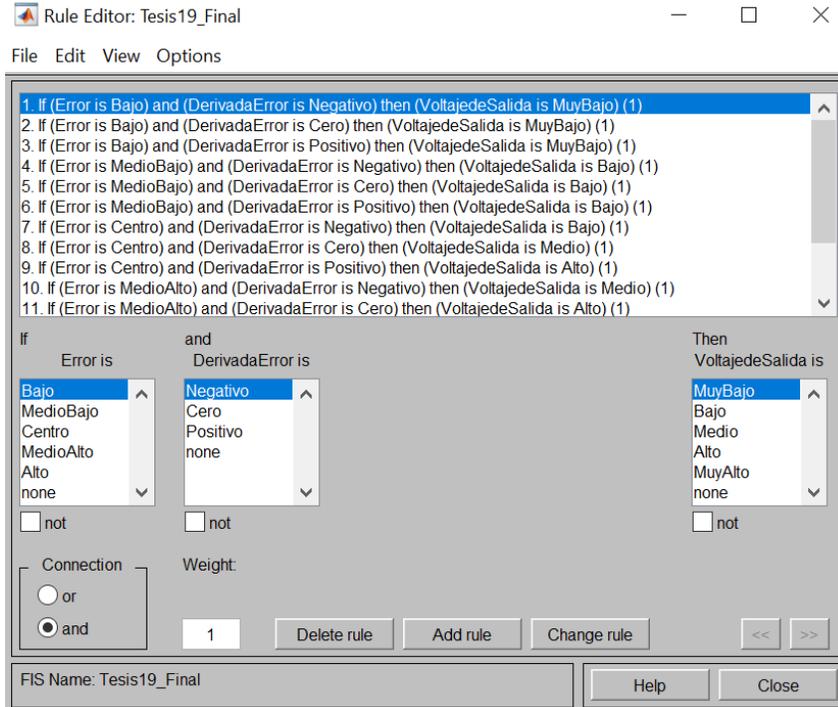


Fig. 23 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 2.

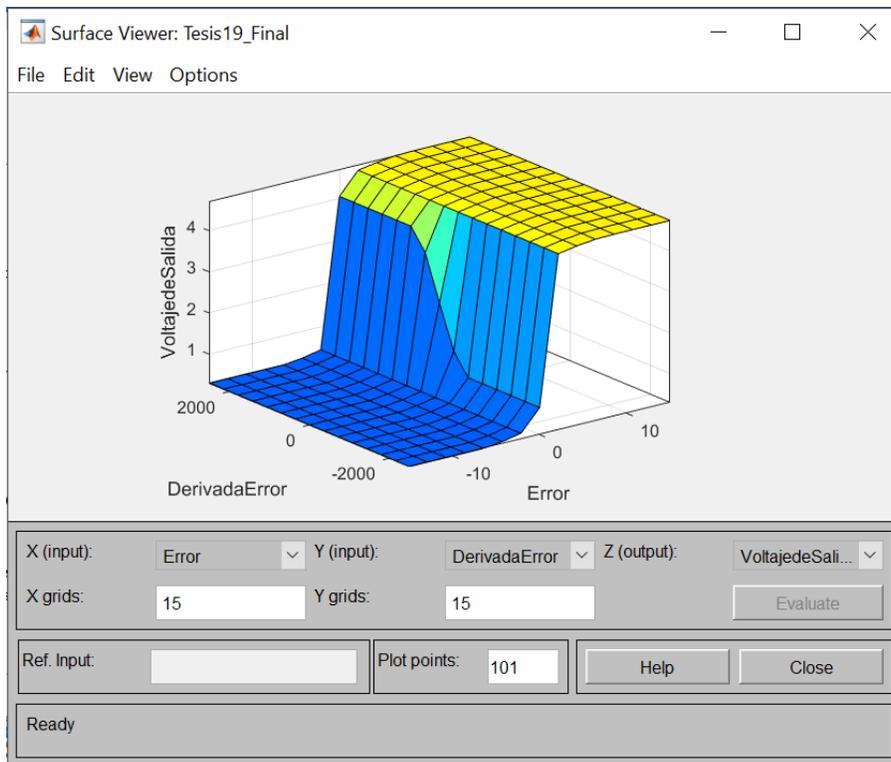


Fig. 24 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 2

TABLA III  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 5 REGLAS CASO 2

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

Comparación en simulación de la respuesta de los controladores fuzzy 5 reglas

Una vez diseñados los controladores fuzzy 5 reglas se exporta cada uno de los controladores diseñados al área de trabajo “To WorkSpace” para la simulación de la respuesta ofrecida por cada uno de los controladores ante el comportamiento de la planta un valor preestablecido como “setpoint” para el sistema. En la siguiente figura se puede apreciar el modelo en lazo cerrado para el sistema de control de la excitatriz del motor Síncrono (ver Fig. 25).

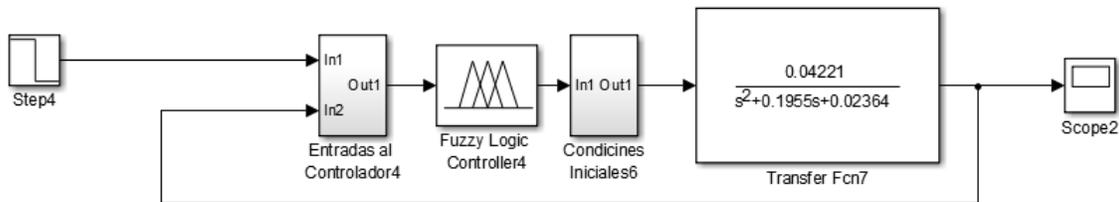


Fig. 25 Sistema en lazo cerrado para la excitatriz del sistema motor generador.

Tomando como referencia los controladores tipo Fuzzy 5 reglas relacionados anteriormente se obtienen respuestas (ver Fig. 26) en donde se puede notar como los dos controladores aun con los sobre picos presentados, logran seguir los cambios estimados en el comportamiento del sistema para el set point.

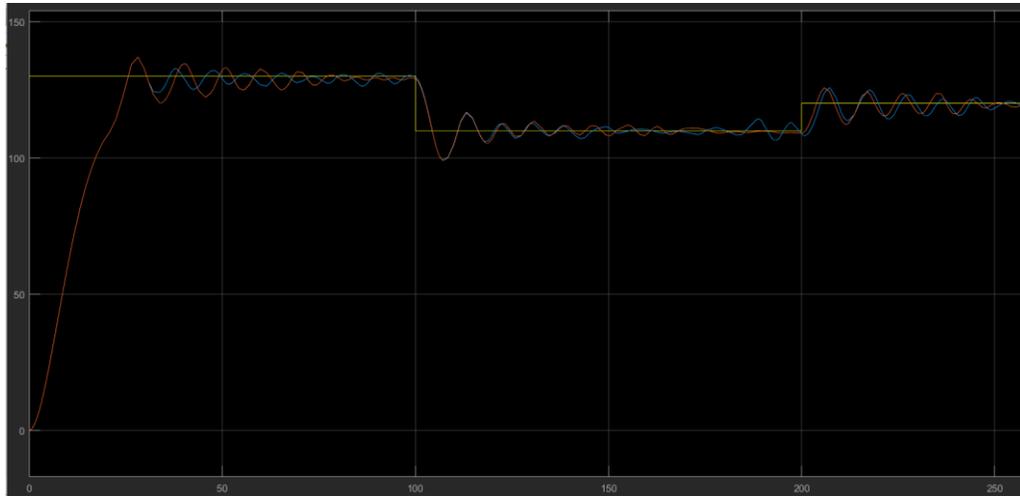


Fig. 26 Respuesta controladores tipo fuzzy 5 reglas CASO 1 y CASO 2.

En la búsqueda de encontrar el controlador que más se ajuste para la excitatriz del motor síncrono de referencia 2711, se comparan las respuestas obtenidas por los controladores tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1 y CASO 2 con otros controladores tipo Fuzzy 5 reglas y controladores clásicos tipo PID. En la figura 27 se puede observar el esquema utilizado para establecer un comparativo entre los controladores mencionados.

La respuesta obtenida para el sistema excitatriz para el controlador PID y los controladores tipo fuzzy 5 reglas CASO 1, CASO 2 y otros controladores tipo Fuzzy 5 reglas diseñados (ver Fig. 28).

En la respuesta obtenida de color rojo de la figura 28 se puede analizar como para tal caso del controlador PID la respuesta claramente sigue los valores establecidos para el set point del sistema motor-generador, sin embargo aunque no se presentan sobre-elongaciones esta cuenta con un tiempo de establecimiento mayor a las respuestas que son obtenidas para los casos de los controladores tipo Fuzzy 5 reglas; para el caso de los controladores tipo Fuzzy diseñados es importante resaltar que representan una salida más rápida aunque con oscilaciones que se magnifican en los tiempos en que son presentados los cambios del valor deseado.

Las respuestas obtenidas para este tipo de controladores aun con las elongaciones presentadas ofrecen una respuesta útil para el control del sistema ya que, en relación a las mismas, estas presentadas con niveles de tensión en función de tiempo para los CASO 1 y CASO 2 presentan cambio en niveles de 1 a 2 v.

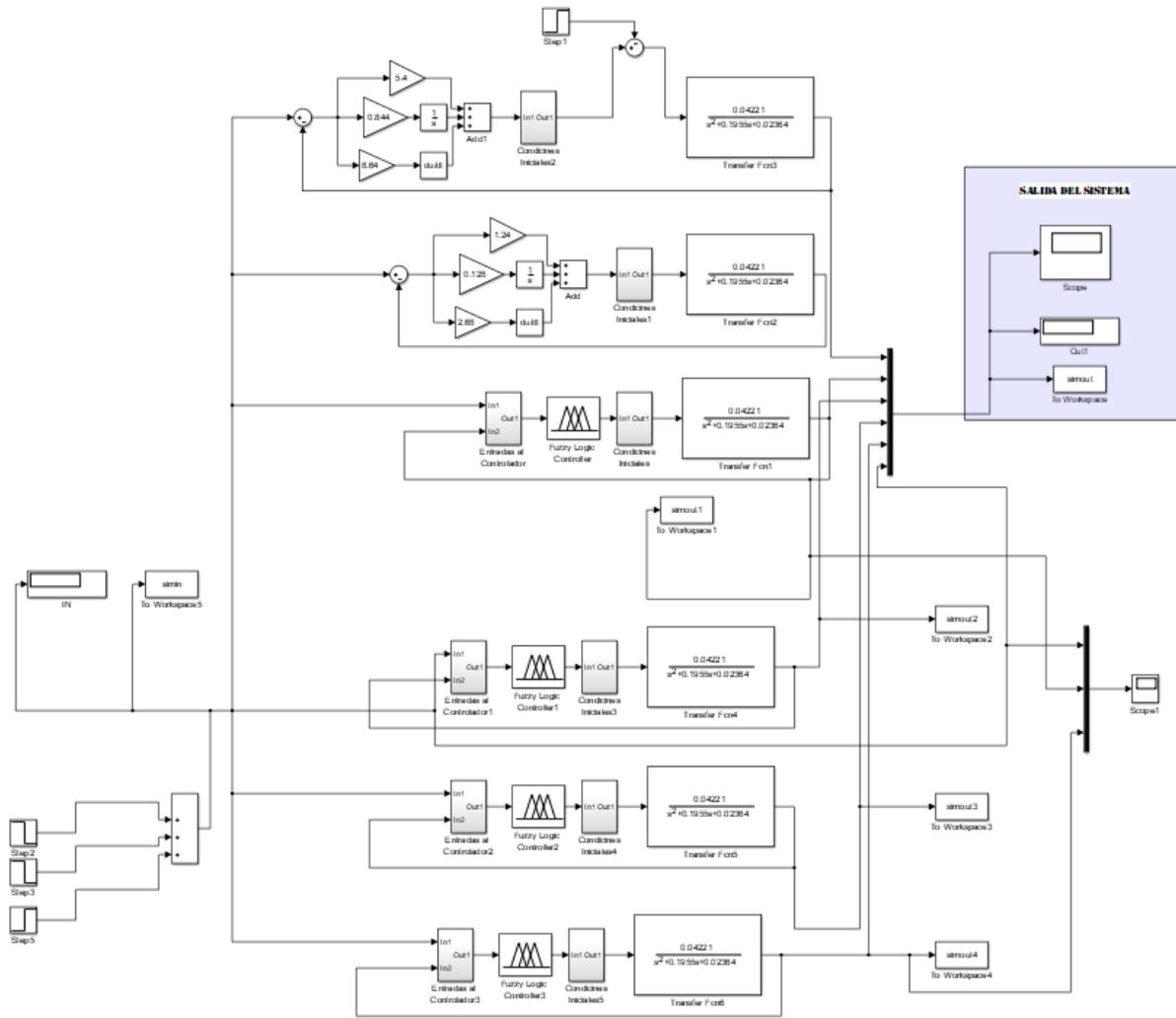


Fig. 27 Esquema comparativo controladores PID y Fuzzy 5 reglas.

Tras analizar la respuesta de los seis controladores diseñados se puede notar como los controladores tipo Fuzzy 5 reglas CASO 1 y CASO 2 ofrecen una mejor respuesta en relación a los cuatro controladores adicionales de la simulación, por lo cual la comparación se remonta a las respuestas de tales casos; las respuestas de la figura 26 muestran un control efectivo, sin embargo, se toma CASO 2 tipo Fuzzy 5 reglas como estimado para implementación y comparación con fuzzy 7 reglas ya que en comparación con tipo fuzzy 5 reglas y los demás controladores es el que cuenta con un margen menor en estado estacionario.

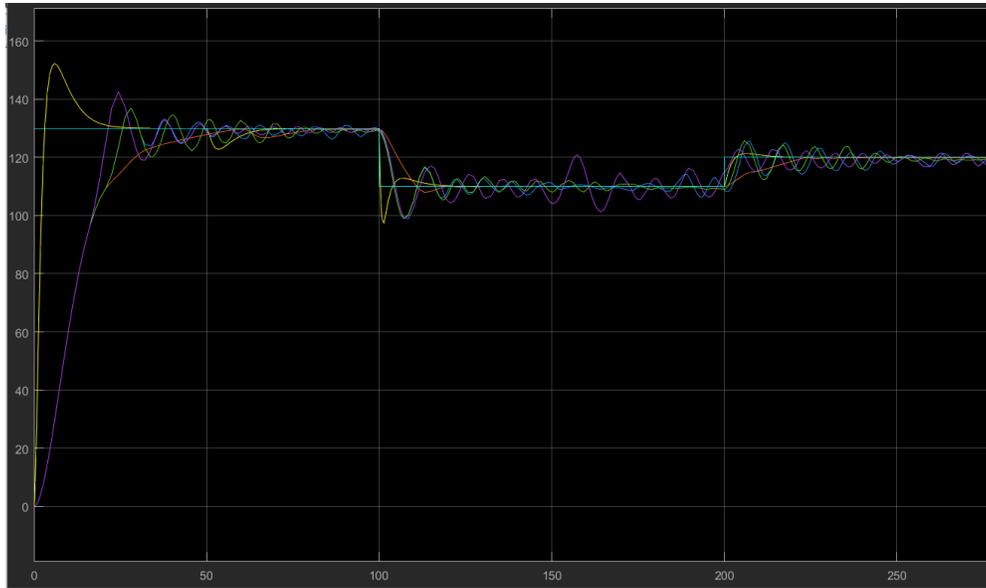


Fig. 28 Respuesta comparativo controladores simulados PID y Fuzzy 5 reglas.

### B. Diseño del controlador tipo Fuzzy 7 reglas

Para el controlador tipo Fuzzy 7 reglas se plantean 4 posibles controladores a partir del ajuste de las reglas para cada caso, a continuación, se especifican las funciones de membresía de entradas y salida para 2 de los casos en mención.

#### CONTROLADOR FUZZY 7 REGLAS. 1 CASO:

Se describe la variable de entrada “error” con su universo de discurso entre -15 y 15 y cada una de sus funciones de membresía. (ver Fig. 29).

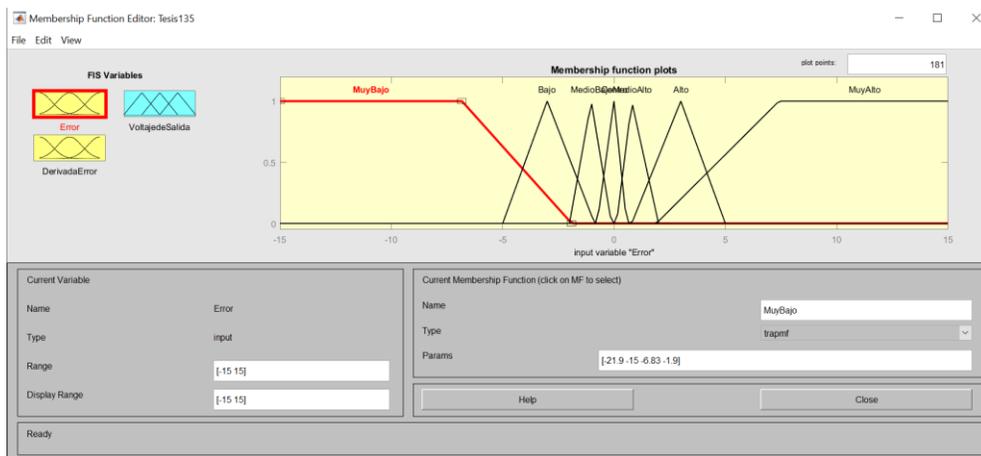


Fig. 29 Membresías de la variable de entrada “error” Fuzzy 7R CASO 1.

- Muy Bajo, 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, 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, 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, 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, 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, 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, es una función semi-trapezoidal definida como,

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

Se describe la variable de entrada “DerivadaError” con su universo de discurso entre -2500 y 2500 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 30).

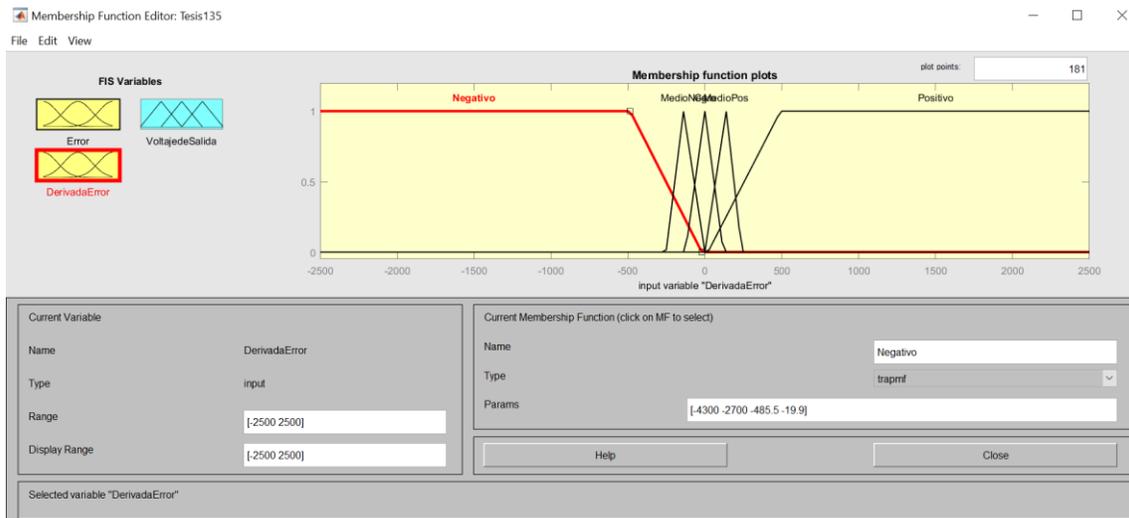


Fig. 30 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” Fuzzy 7R CASO1.

- Negativo, 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, 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, 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, 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, es una función semi-trapezoidal definida como,

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

Se describe la variable de salida “VoltajeSalida” con su universo de discurso entre 0 y 5 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 31).

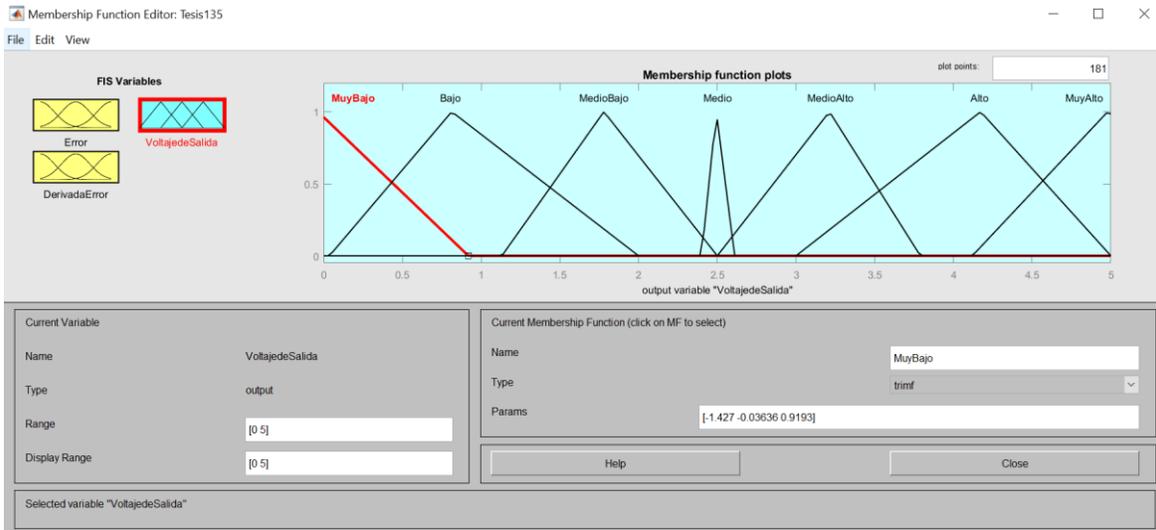


Fig. 31 Membresías de la variable de salida “VoltajeSalida” Fuzzy 7R CASO1.

- MuyBajo, es una función triangular definida como,

$$MuyBajo = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ -1,087x + 1 & 0 < x < 0,9193 \\ 0 & x \geq 0,9193 \end{cases}$$

- Bajo, es una función triangular definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq 0,03636 \\ 1,286x - 0,046 & 0,03636 < x < 0,8135 \\ -0,8428x + 1,6856 & 0,8135 < x < 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

- Medio Bajo, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq 1,132 \\ 1,543x - 1,7466 & 1,132 < x < 1,78 \\ -1,388x + 3,47 & 1,78 < x < 2,5 \\ 0 & x \geq 2,5 \end{cases}$$

- Medio, es una función triangular definida como,

$$Medio = \begin{cases} 0 & x \leq 2,4 \\ 10,63x - 25,512 & 2,4 < x < 2,494 \\ -8,62x + 22,5 & 2,494 < x < 2,61 \\ 0 & x \geq 2,61 \end{cases}$$

- Medio Alto, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 2,5 \\ 1,40x - 3,5 & 2,5 < x < 3,212 \\ -1,7301x + 6,55 & 3,212 < x < 3,79 \\ 0 & x \geq 3,79 \end{cases}$$

- Alto, es una función triangular definida como,

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

- MuyAlto, es una función triangular definida como,

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

Se fija la base de reglas de la tabla 4 (ver Fig. 32), en ella se establecen las relaciones lógicas entre las variables lingüísticas de entrada y salida para el controlador tipo Fuzzy 7 CASO1 (ver Fig. 33).

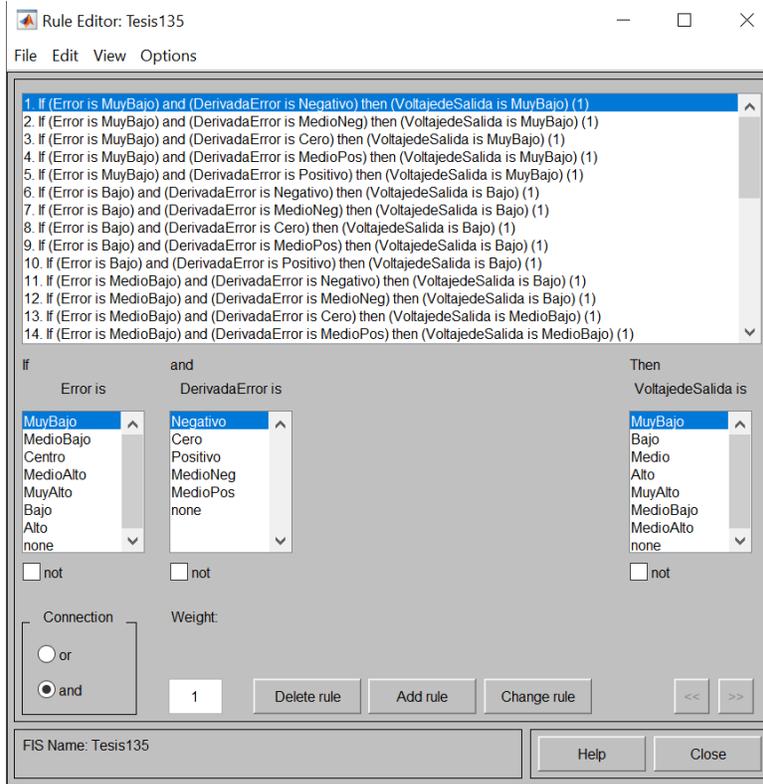


Fig. 32 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 7 CASO1

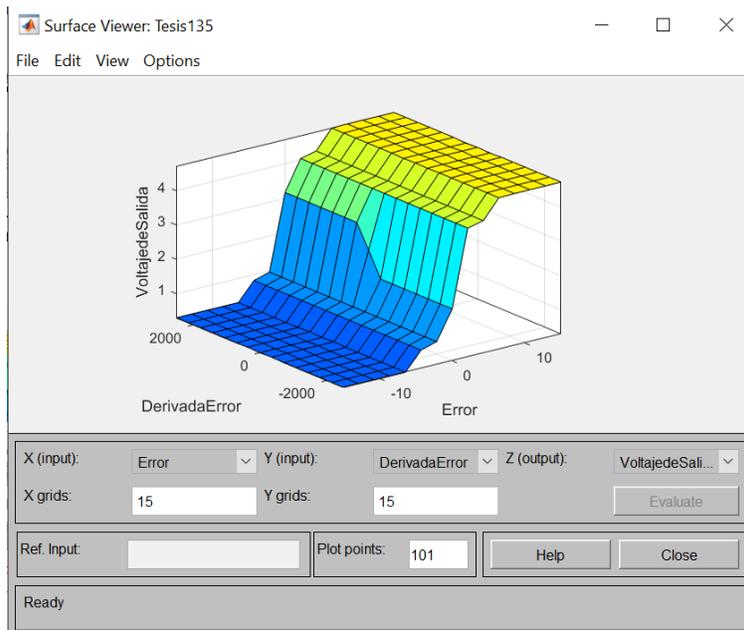


Fig. 33 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 7 reglas CASO 1

TABLA IV  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 7 REGLAS CASO 1

	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

CONTROLADOR FUZZY 7 REGLAS. 2 CASO:

Se describe la variable de entrada “error” con su universo de discurso entre -15 y 15 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 34)

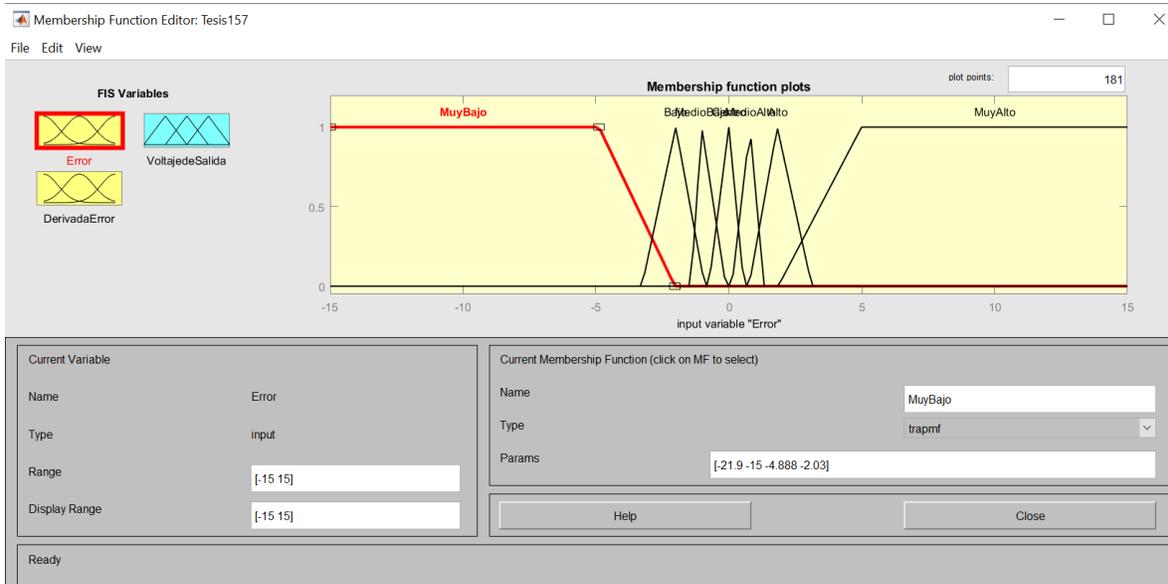


Fig. 34 Membresías de la variable de entrada “error” Fuzzy 7R CASO 2.

- Muy Bajo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Muy\ Bajo = \begin{cases} 1 & x \leq -4,888 \\ -0,349x - 0,708 & -4,888 < x < -2,03 \\ 0 & x \geq -2,03 \end{cases}$$

- Bajo, es una función triangular definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq -3,27 \\ 0,783x + 2,487 & -3,27 < x < -1,994 \\ -0,918x - 0,830 & -1,994 < x < -0,905 \\ 0 & x \geq -0,905 \end{cases}$$

- MedioBajo, es una función triangular definida como,

$$MedioBajo = \begin{cases} 0 & x \leq -1,429 \\ 2,444x + 0,349 & -1,429 < x < -1,02 \\ -1,103x - 0,125 & -1,02 < x < -0,114 \\ 0 & x \geq -0,114 \end{cases}$$

- Centro, 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, es una función triangular definida como,

$$Medio Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,114 \\ 1,470x - 0,167 & 0,114 < x < 0,794 \\ -1,886x + 2,497 & 0,794 < x < 1,324 \\ 0 & x \geq 1,324 \end{cases}$$

- Alto, es una función triangular definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 0,759 \\ 0,942x - 0,714 & 0,759 < x < 1,82 \\ -0,766x + 2,392 & 1,82 < x < 3,124 \\ 0 & x \geq 3,124 \end{cases}$$

- MuyAlto, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$MuyAlto = \begin{cases} 0 & x \leq 1,86 \\ 0,319x - 0,593 & 1,86 < x < 4,994 \\ 1 & x \geq 4,994 \end{cases}$$

Se describe la variable de entrada “DerivadaError” con su universo de discurso entre -2500 y 2500 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 35).

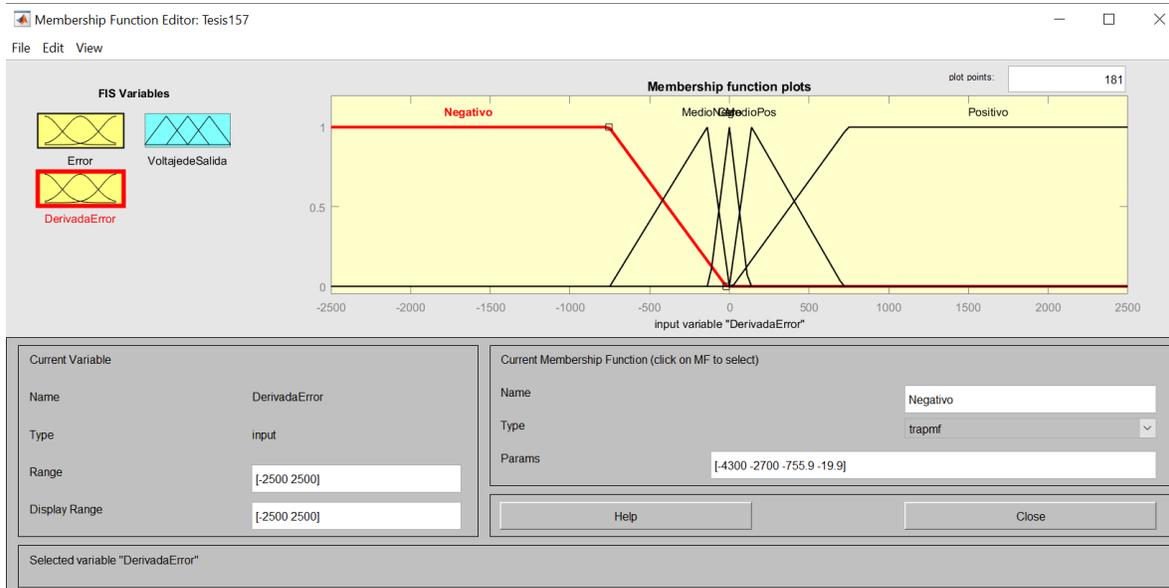


Fig. 35 Membresías de la variable de entrada “DerivadaError” Fuzzy 7R CASO2.

- Negativo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Negativo = \begin{cases} 1 & x \leq -755,9 \\ -0,00135x - 0,027 & -755,9 < x < -19,9 \\ 0 & x \geq -19,9 \end{cases}$$

- Medio Neg, es una función triangular definida como,

$$Medio Neg = \begin{cases} 0 & x \leq -750 \\ 0,001636x + 1,227 & -750 < x < -139 \\ -0,00719x & -139 < x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

- Cero, 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, es una función triangular definida como,

$$Medio Pos = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 0,00719x & 0 < x < 139 \\ -0,001737x + 1,241 & 139 < x < 714,7 \\ 0 & x \geq 714,7 \end{cases}$$

- Positivo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$Positivo = \begin{cases} 0 & x \leq 19,9 \\ 0,00138x - 0,027 & 19,9 < x < 744,1 \\ 1 & x \geq 744,1 \end{cases}$$

Se describe la variable de salida “VoltajedeSalida” con su universo de discurso entre 0 y 5 y cada una de sus funciones de membresía (ver Fig. 36).

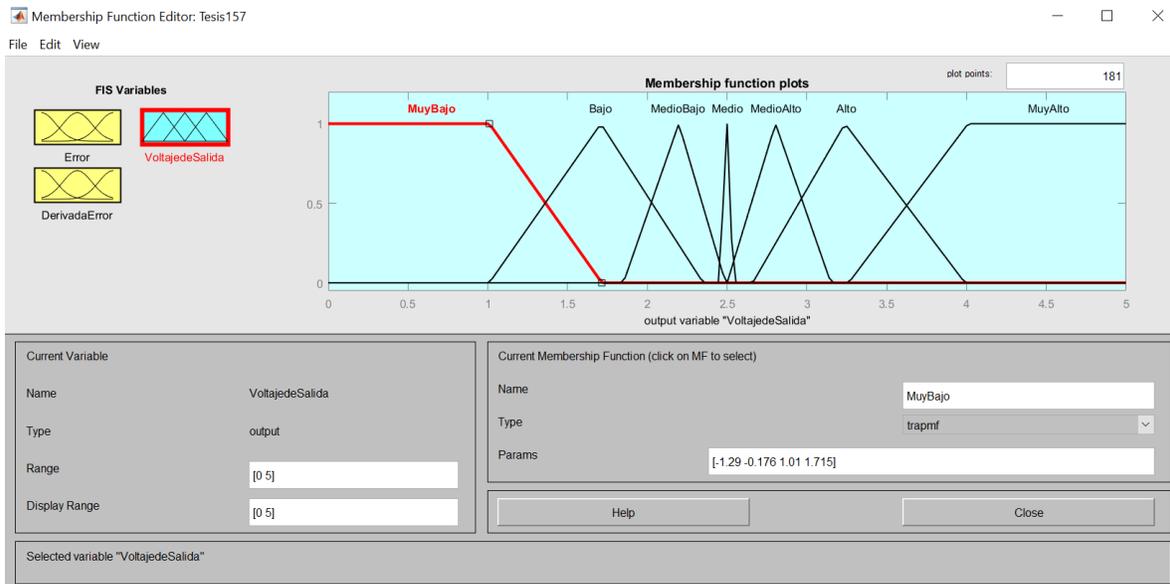


Fig. 36 Membresías de la variable de salida “VoltajedeSalida” Fuzzy 7R CASO2.

- MuyBajo, es una función semi-trapezoidal definida como,

$$MuyBajo = \begin{cases} 0 & x \leq 1,01 \\ -1,41x + 2,432 & 1,01 < x < 1,715 \\ 0 & x \geq 1,715 \end{cases}$$

- Bajo, es una función triangular definida como,

$$Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq 1,01 \\ 1,430x - 1,444 & 1,01 < x < 1,709 \\ -1,560x + 3,666 & 1,709 < x < 2,35 \\ 0 & x \geq 2,35 \end{cases}$$

- Medio Bajo, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Bajo = \begin{cases} 0 & x \leq 1,85 \\ 2,881x - 5,32 & 1,85 < x < 2,197 \\ -3,41x + 8,49 & 2,197 < x < 2,49 \\ 0 & x \geq 2,49 \end{cases}$$

- Medio, es una función triangular definida como,

$$Medio = \begin{cases} 0 & x \leq 2,45 \\ 20x - 49 & 2,45 < x < 2,5 \\ -26,31x + 66,77 & 2,5 < x < 2,538 \\ 0 & x \geq 2,538 \end{cases}$$

- Medio Alto, es una función triangular definida como,

$$Medio\ Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 2,5 \\ 3,3x - 8,25 & 2,5 < x < 2,803 \\ -2,88x + 9,072 & 2,803 < x < 3,15 \\ 0 & x \geq 3,15 \end{cases}$$

- Alto, es una función triangular definida como,

$$Alto = \begin{cases} 0 & x \leq 2,66 \\ 1,73x - 4,60 & 2,66 < x < 3,238 \\ -1,329x + 5,30 & 3,238 < x < 3,99 \\ 0 & x \geq 3,99 \end{cases}$$

- MuyAlto, es una función triangular definida como,

$$MuyAlto = \begin{cases} 0 & x \leq 3,26 \\ 1,333x - 4,346 & 3,26 < x < 4,01 \\ 0 & x \geq 4,01 \end{cases}$$

Se fija la base de reglas de la tabla 5 (ver Fig. 37), en ella se establecen las relaciones lógicas entre las variables lingüísticas de entrada y salida para el controlador tipo Fuzzy 7 CASO2 (ver Fig. 38).

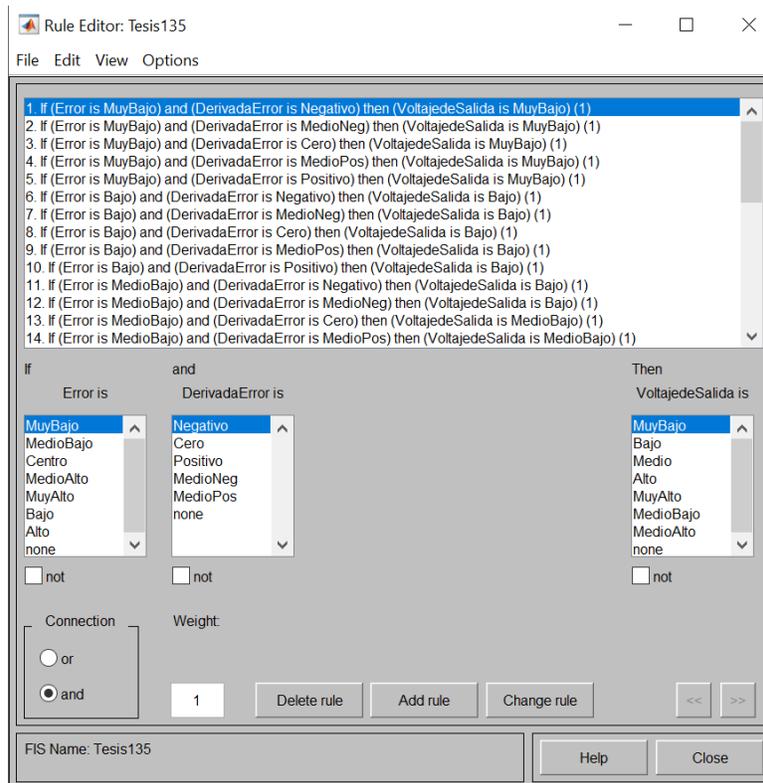


Fig. 37 Base de reglas de controlador tipo Fuzzy 7 CASO2

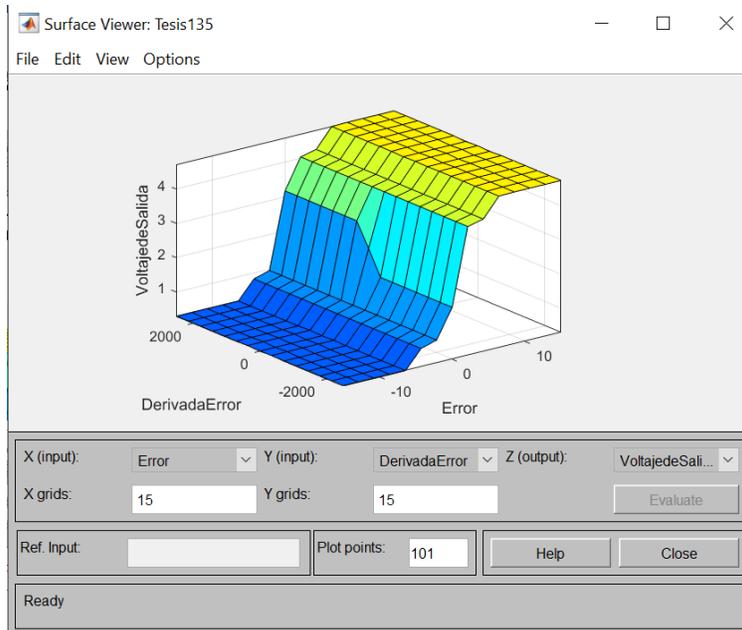


Fig. 38 Simulación salida variable de control del controlador difuso controlador tipo Fuzzy 7 reglas CASO 2

TABLA V  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 7 REGLAS CASO 2

	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

Comparación en simulación de la respuesta de los controladores fuzzy 7 reglas

Para el caso de los controladores Fuzzy 7 reglas CASO 1 y CASO 2 con otros controladores tipo Fuzzy 7 reglas y un controlador clásico tipo PID, se realiza la comparación presentada para los controladores tipo fuzzy 5 reglas anteriormente (ver Fig. 39).

En la figura se puede analizar que de manera general los controladores diseñados fuzzy 7 logran dar seguimiento a la señal tomada como referencia; particularmente comparando los CASO1 y CASO2 (ver Fig. 40) seleccionados para estudio en este documento, CASO1 presenta menos sobre elongaciones (siendo esta la respuesta mostrada en tonalidad azul) respecto de CASO2 (siendo esta la respuesta mostrada en tono amarillo). Se selecciona CASO1 para posteriores comparaciones.

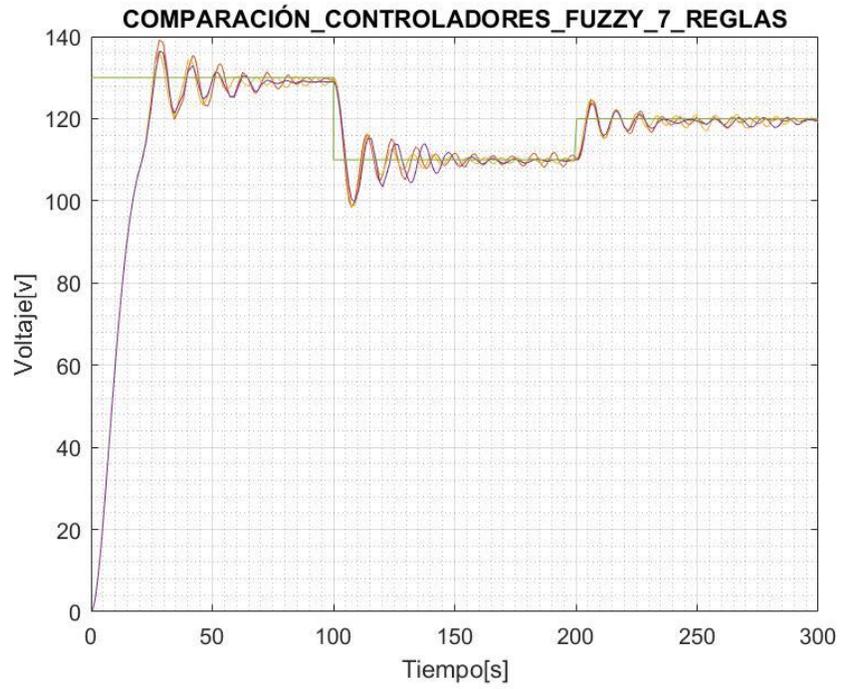


Fig. 39 Comparación entre controladores fuzzy 7 reglas.

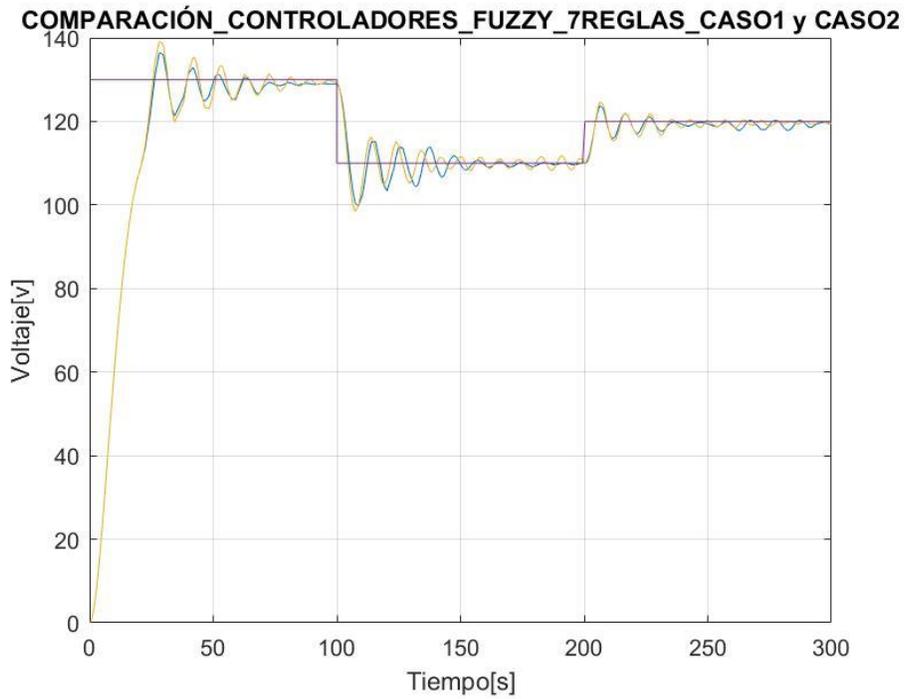


Fig. 40 Comparación entre controladores fuzzy 7 reglas CASO1 y CASO2.

### C. Aplicación de redes neuronales en el sistema de control de la máquina síncrona

Las redes neuronales artificiales (RNA) representan un elemento de gran importancia en las denominadas tecnologías de la IA (Inteligencia Artificial), como rama de la computación que se encarga, entre otras cosas, de los problemas de percepción, razonamiento y aprendizaje en relación a los sistemas artificiales. [24]

Se destaca que las RNA presentan en ciertos campos claras ventajas sobre las computadoras digitales comunes pues no sólo son capaces de aprender de la experiencia sin grandes complicaciones de software o de hardware, sino que pueden resolver en forma sencilla y económica algunos de los problemas que constituyen los mayores retos para las computadoras tradicionales, tales como el reconocimiento de patrones complejos, procesamiento de imágenes, generación e interpretación de lenguaje natural y problemas de clasificación y diagnóstico difusos. [24]

Estas RNA pueden ser definidas como modelos simplificados de redes de neuronas individuales procesadoras, que se interconectan masivamente con una organización jerárquica, que buscan emular por medio de hardware o software, el sistema nervioso biológico. Las neuronas cuentan con una estructura compuesta principalmente por el núcleo, el axón, la sinapsis, dendritas y soma (ver Fig. 41); El soma o cuerpo de la neurona tienen como función encargarse de las actividades metabólicas recibiendo información de otras neuronas por medio de la sinapsis. Las dendritas representan las ramificaciones derivadas del cuerpo que se encargan de la recepción de las señales de otras células, mientras el axón permite el envío de impulsos a otras células nerviosas.

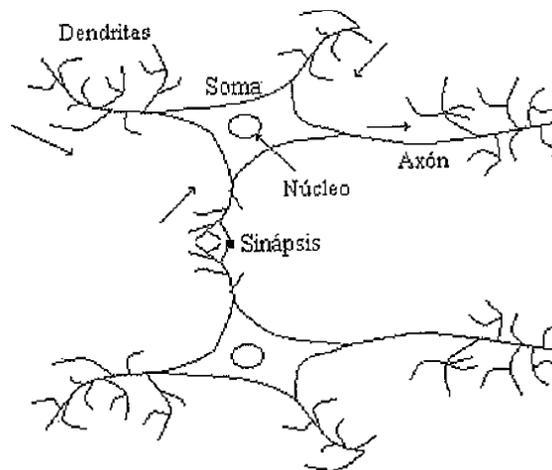


Fig. 41 Estructura de una neurona.

Las redes neuronales diferenciales son sistemas de control inteligente que buscan controlar los sistemas no lineales, en casos en que la teoría de control convencional no

funciona y se opta por otras alternativas de control, como lo pueden ser el control difuso, algoritmo genético o como lo es para este estudio las redes neuronales artificiales.

En la ingeniería de control el objetivo principal es crear sistemas autónomos o inteligentes los cuales sean capaces de trabajar en cualquier circunstancia, estos tipos de sistemas se les plantea un objetivo y estos deben cumplir por más complejo que sea el sistema, esto por medio de la retroalimentación que adquiere el sistema a partir de los diferentes sensores que se ven involucrados en el proceso, el cual continuará adaptándose a los diferentes cambios que sufra el entorno. [25]

Las estructuras de las redes neuronales están basadas en sistemas biológicos como puede ser los modelos matemáticos que modelan una red neuronal de un ser humano, encontramos varias tipologías de redes neuronales que pueden ser separadas en redes neuronales estáticas o dinámicas, una definición sencilla de una red neuronal estática es aquella la cual aprende un patrón de información a partir de datos suministrados, los cuales también pueden incluir retardos de tiempo y a partir de estos solucionar problemáticas y/o encontrar la respuesta correspondiente. [25]

Ya que uno de los modelos que tienen potencial para la aplicación en sistemas autónomos son las redes neuronales artificiales, en este trabajo se plantea el diseño de alternativas que utilizan redes neuronales de clonación con retardos para los bloques principales del lazo de control del sistema de la excitatriz de la máquina síncrona.

Inicialmente se plantea el diseño de una red que emule el comportamiento de la planta, esto teniendo en cuenta la gran importancia que tiene el contar con sistemas de respaldo en el control de procesos y de la calidad y la predicción de fallos operacionales. Para tal fin, se plantea una toma de datos de entrada y salida de la planta (ver Fig. 42), como información relevante para el entrenamiento de la red.

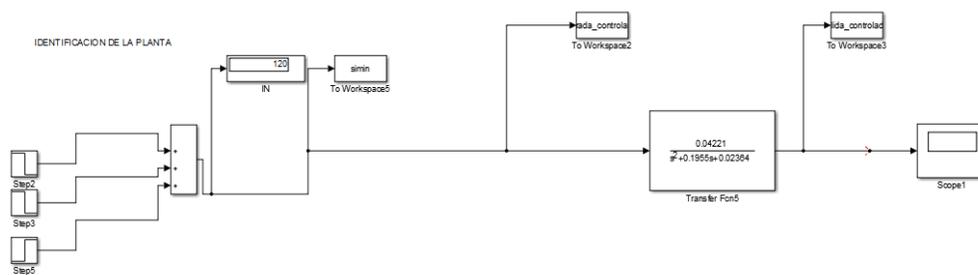


Fig. 42 Diagrama de bloques para toma de datos de entrada y salida de la planta (excitatriz máquina síncrona)

Para el entrenamiento de la red neuronal se fija como entrada, las entradas y salidas del bloque y se establecen las funciones de activación (tansig y purelin). Se fijan el número de capas y épocas de entrenamiento (ver Fig. 43) y se establece el error estimado como resultado de la red.

```

in = [entrada_controlador.signals.values salida_controlador.signals.values];
in = in';
Net=newff(minmax(in),[10 10 1],{'tansig' 'tansig' 'purelin'});
Net.trainparam.epochs=400;
Net.trainparam.goal=1e-20;
Net=train(Net,in,salida_controlador.signals.values');
sim(Net,in);
gensim(Net)

```

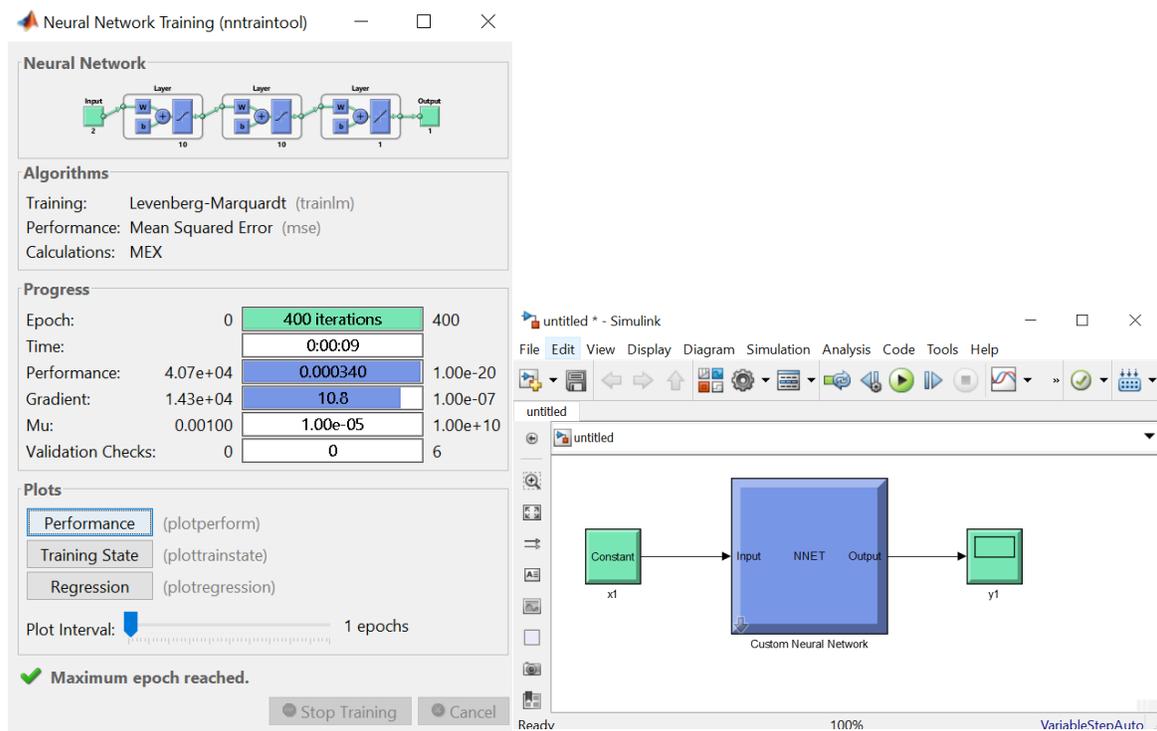


Fig. 43 Entrenamiento de la red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona)

Una vez obtenido el bloque de la red neuronal, se valida el funcionamiento en condiciones similares (ver Fig. 44) para conocer la respuesta de la misma; se puede apreciar que se logra emular en su totalidad el comportamiento de la planta (ver Fig. 45).

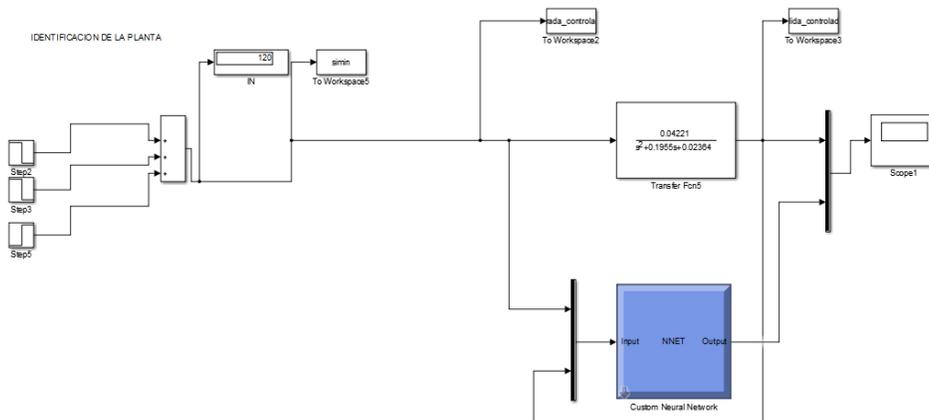


Fig. 44 Red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona)

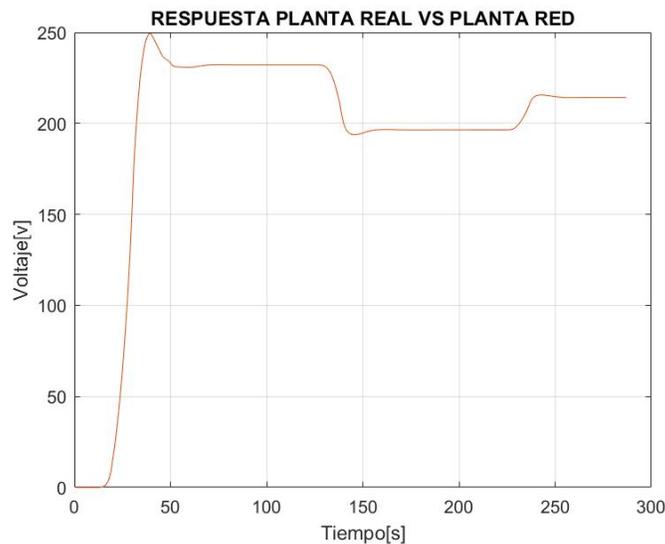


Fig. 45 Respuesta de la red de identificación de la planta (excitatriz máquina síncrona)

La identificación en este caso nos permite contar con un bloque que realiza emula en su totalidad el comportamiento de la planta, sin embargo, con la intención de brindar robustez al sistema y veracidad a la información propia del comportamiento de la planta, se plantea analizar el comportamiento de esta incluyendo un controlador convencional tipo PID.

Para realizar la prueba mencionada anteriormente, se diseña el diagrama en bloques en el cual se contempla un controlador de tipo PID [14]; en paralelo se sitúan los dos bloques que ejemplifican la planta (ver Fig. 46).

Se logra apreciar una gran similitud entre las respuestas obtenidas desde el punto de vista del seguimiento a la trayectoria que es marcada por los sets point del sistema, sin embargo, para el caso de la red se presentan sobre impulsos que no logran ser controlados (ver Fig. 47), lo cual sugiere el ajuste de los parámetros del controlador.

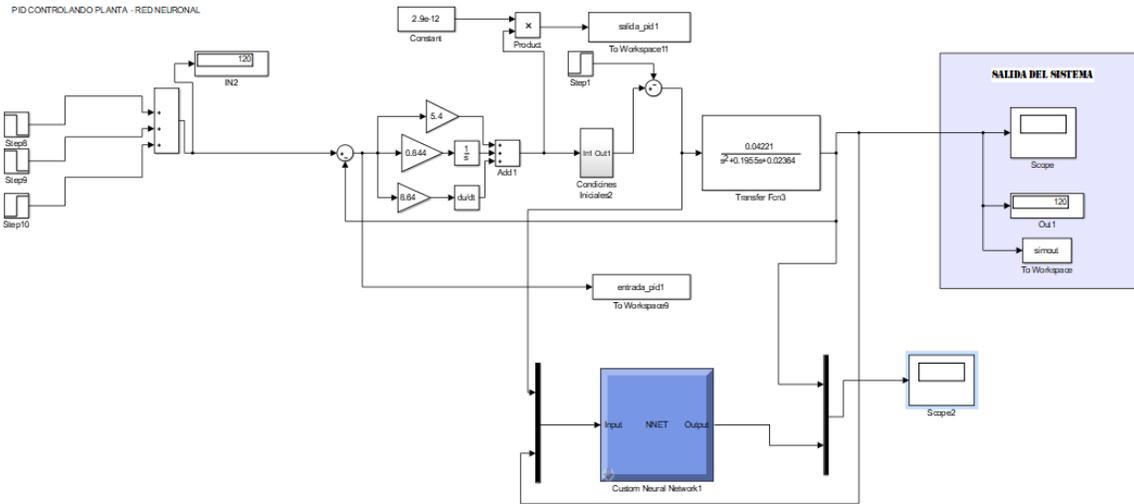


Fig. 46 Diagrama de bloques tomando la red neuronal como planta y controlador PID.

Otra de las pruebas realizadas consiste en tomar un controlador de tipo PID previamente diseñado para el control de la excitatriz de la máquina y buscar emular el comportamiento con una red neuronal. Para este caso se toma como entrada para el entrenamiento de la red la entrada del controlador PID (ver Fig. 48) que está dada por el error y se utiliza la salida del controlador PID. Esto nos permite a partir del entrenamiento, obtener una señal (ver Fig. 49) que pretende simular el comportamiento del controlador dentro del lazo de control.

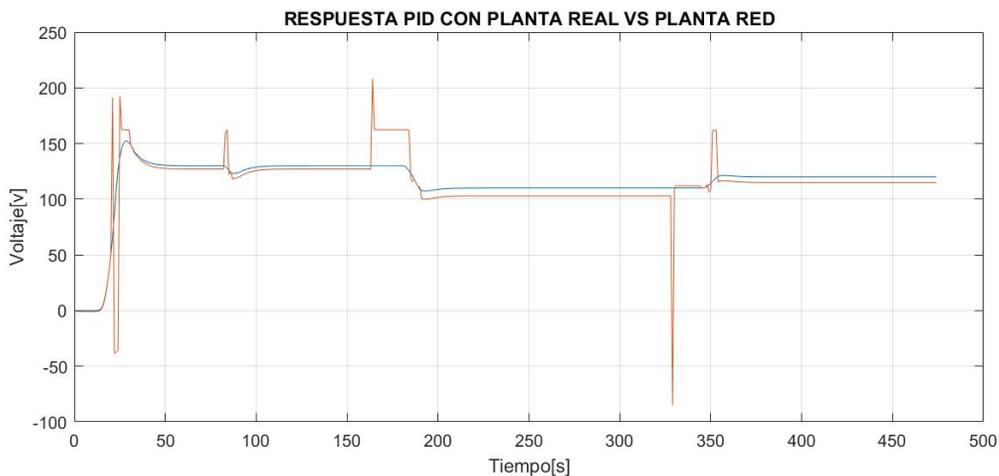


Fig. 47 Comparación de la respuesta del controlador PID tomando la planta como función de transferencia y como red neuronal.

Por otra parte, se diseña una red neuronal para el control de la excitatriz de la máquina síncrona. Para el diseño de la red se toma la señal del error y la salida del controlador difuso 7 reglas. Se realiza el entrenamiento de la red (ver Fig. 48) y se utilizan las funciones de activación Tansig y Purelin.

```

in = [error_siete];
in = in';
Net=newff(minmax(in),[10 10 1],{'tansig' 'tansig' 'purelin'});
Net.trainparam.epochs=100;
Net.trainparam.goal=1e-20;
Net=train(Net,in,salida_siete');
sim(Net,in);
gensim(Net)

```

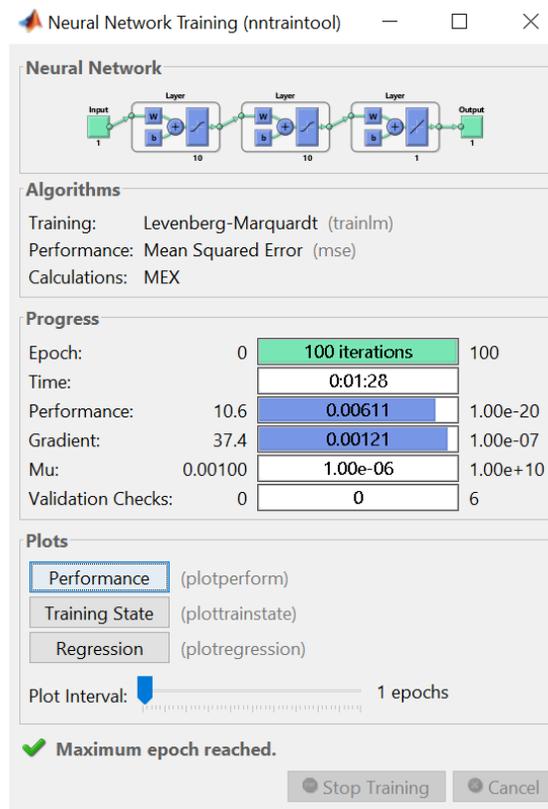


Fig. 48 Entrenamiento de la red neuronal.

Una vez realizado el entrenamiento de la red neuronal, se implementa esta en simulación (ver Fig. 49) para validar el control que pueda ser ejercido por la red.

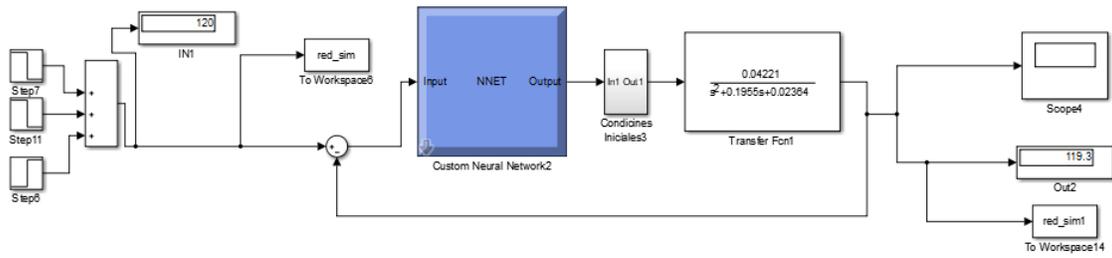


Fig. 49 Diagrama de bloques para simulación del sistema control con la red neuronal.

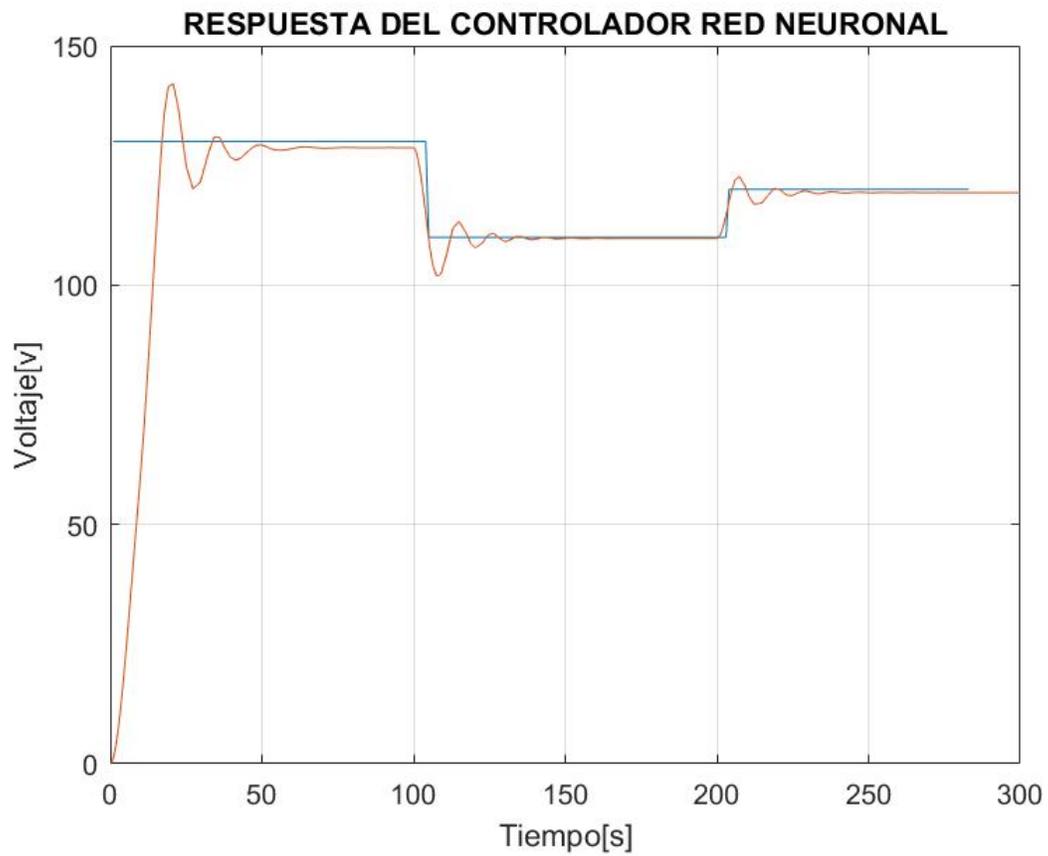


Fig. 50 Respuesta de control simulada de la red neuronal.

# CAPÍTULO IV

## *COMPARATIVO CONTROLADORES*

### *INTELIGENTES*

**P**ara implementar los controladores diseñados en la herramienta computacional Matlab® se hace uso de la tarjeta de National Instrument NI USB 6009 la cual de la mano su Toolbox para la adquisición de datos y el software de reconocimiento de la tarjeta NI-DAQmx, permite establecer la conexión con el sistema motor-generator por medio del módulo de potencia convertidor (DC/DC). La acción de control es definida como un nivel de tensión que varía a partir de la acción determinada por la técnica de control inteligente que es utilizada que para el caso específico de este trabajo se emplean controladores clásicos PID, tipo Fuzzy 3, 5 y 7 reglas y redes neuronales.

#### I. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6009

NI USB 6009 de National Instruments es una tarjeta de adquisición de datos que cuenta con 8 canales de entradas análogas “AI”, dos canales de salidas análogas “AO”, 12 canales de entrada/salida digital y un contador de 32 bits con interfaz USB de alta velocidad. [26]

Esta tarjeta que como software de programación utiliza NI-DAQmx cuenta con un máximo de frecuencia de muestreo de 48KS/s en las entradas análogas por canal individual y una configuración DIO de colector abierto o control activo.

Respecto del hardware de esta tarjeta de National Instruments, (ver Fig. 51) (ver Fig. 52) que se ilustran a continuación se muestra la distribución de las entradas y salidas análogas y digitales. [26]

Modulo	Terminal	Señal, Nodo Simple	Señal, Diferencial
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Fig. 51 Terminal análogo NI USB 6009.

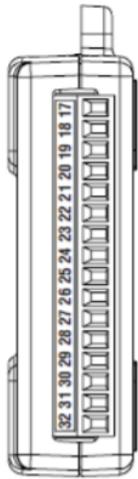
Modulo	Terminal	Señal
	17	PO.0
	18	PO.1
	19	PO.2
	20	PO.3
	21	PO.4
	22	PO.5
	23	PO.6
	24	PO.7
	25	PI.0
	26	PI.1
	27	PI.2
	28	PI.3
	29	PFI 0
	30	+2.5V
	31	+5V
	32	GND

Fig. 52 Terminal digital NI USB 6009.

Como se pudo apreciar en la figura 4.2 la terminal análoga cuenta con una distribución de 8 entradas análogas distribuidas entre AI0-AI7 y dos salidas análogas AO0 y AO1. Para el desarrollo de este proyecto se utilizan dos canales de la tarjeta de adquisición de datos (ver Fig. 53); el canal 0 para la entrada análoga y el canal 0 para la salida análoga.



Fig. 53 Canales análogos utilizados de la NI USB 6009 para envío y recepción de datos de la máquina síncrona..

La máquina síncrona utilizada es un motor síncrono referencia 2711 de la empresa hps-systemtechnik. Para la adquisición de la data 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. [27]

Este módulo no solo permite poder implementar el control que parte desde la adquisición de la data 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 [28]- [30]. Contar con un módulo que presente una forma práctica de utilización, facilita el poder empalmar la puesta en marcha del sistema de la mano de las tecnologías de la información y comunicación, para crear herramientas virtuales que guíen la implementación del mismo. [26], [31]

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 219 v y 220 v, esto permitiendo un rango de operatividad de 65,6 v para el motor síncrono en tensión máxima ( $V_{max}$ ).

La data que se obtiene tiene 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. 54). La figura muestra cómo se presenta una reacción en la salida ante la entrada de voltaje, utilizada como señal de control.

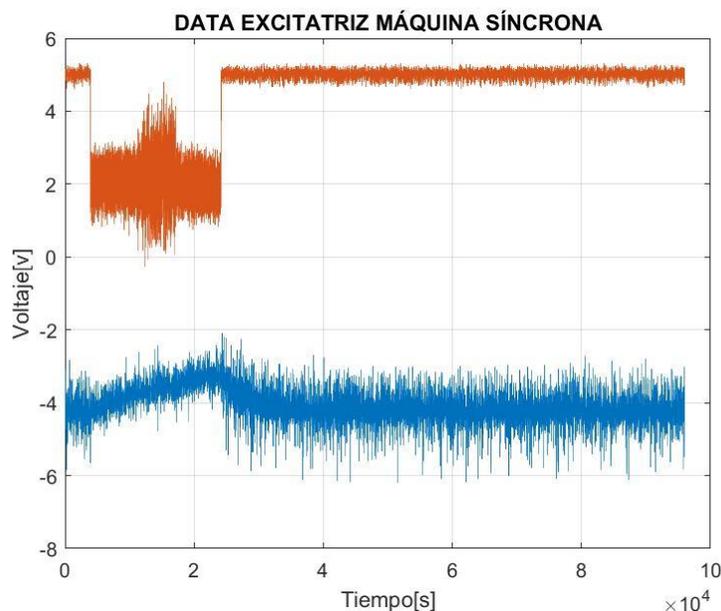


Fig. 54. Respuesta de la excitatriz de la máquina síncrona ante una entrada de control tipo escalón.

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, con el fin de estimar la efectividad de la acción de control que se busque implementar, para ello 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. 55).[14], [32], [33]

En función de identificar si el sistema cuenta con la capacidad de responder oportunamente ante las variaciones de la señal de control (ver Fig. 56).

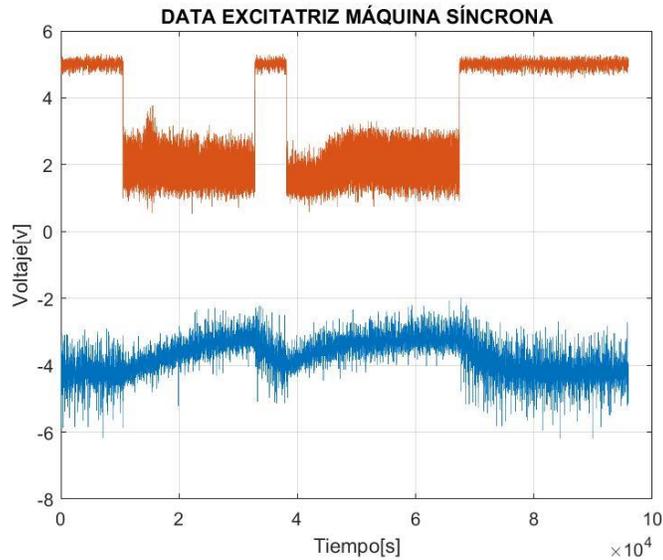


Fig. 55. Respuesta de la excitatriz ante variaciones de la señal de voltaje utilizada como señal de control.

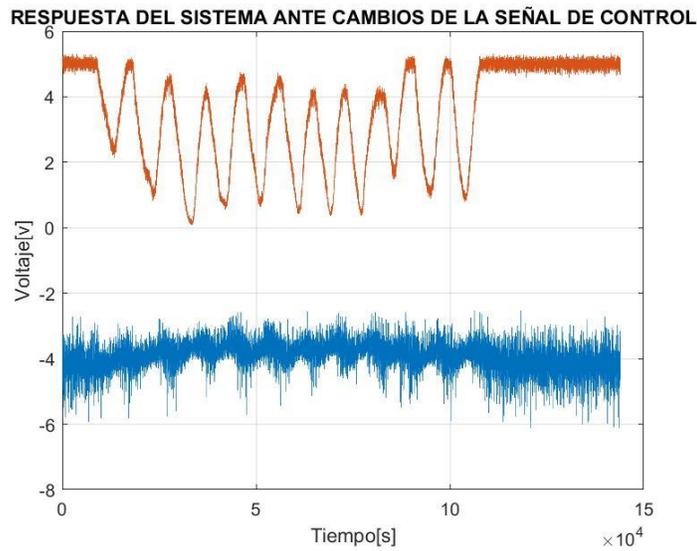


Fig. 56. Respuesta de la excitatriz ante variaciones rápidas de la señal de voltaje utilizada como señal de control.

## II. COMPARACIÓN FUZZY 5 REGLAS VS FUZZY 7 REGLAS

Con la intención de establecer una comparación y así definir cual se estimaría como el controlador más apto para implementación y lograr el control de la excitatriz del motor síncrono de referencia 2711 mencionado anteriormente se tomaron el controlador tipo Fuzzy 5 reglas CASO 2 y controlador tipo Fuzzy 7 reglas CASO 1 los cuales como se pudo apreciar en el análisis del capítulo III, fueron los controladores que ofrecieron una mejor respuesta para cada grupo de controladores.

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. [14], [15]

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 3 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 6 se puede apreciar la base de reglas establecidas para el controlador difuso 3 reglas.

TABLA VI  
BASE DE REGLAS CONTROLADOR DIFUSO 3 REGLAS

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

Como resultado del controlador difuso 3 reglas y el controlador de referencia PID se obtiene para los dos casos una respuesta estable (ver Fig. 57) simulada utilizando la Toolbox de Matlab. 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. [14]



Fig. 57. Respuesta del controlador PID y difuso 3 reglas en el sistema excitatriz del motor síncrono.

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. 58). Se puede apreciar que el controlador difuso 7 reglas se presenta de manera relativa una respuesta mejorada en comparación con los controladores difusos 3 y 5 reglas.

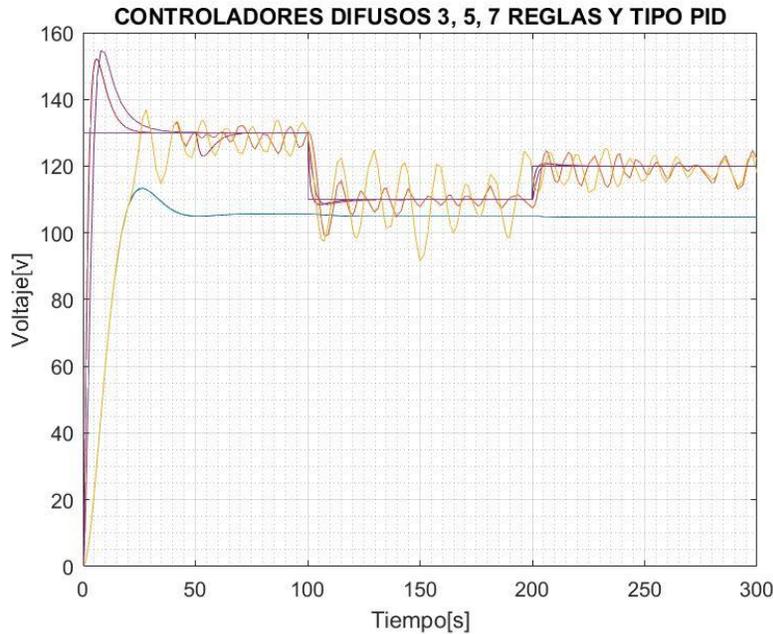


Fig. 58. Comparación entre las respuestas de los controladores difusos y el controlador clásico PID.

### III. COMPARACIÓN CONTROLADORES EN TIEMPO REAL

Para realizar la comparación de los controladores previamente diseñados se realiza el enlace entre los componentes del sistema real (sistema motor-generador, convertidor DC/DC) y la Toolbox de Matlab por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009. En esta aplicación se configuran el canal 0 para la entrada y el canal 0 para la salida de la tarjeta (ver Fig. 59).

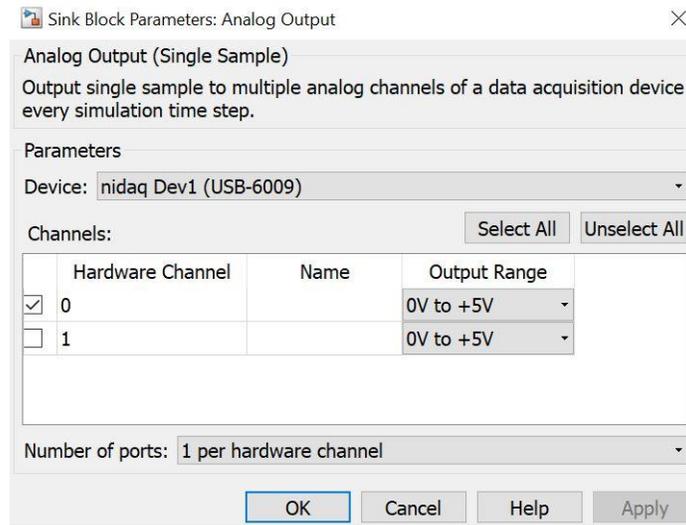


Fig. 59. Configuración de la salida de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.

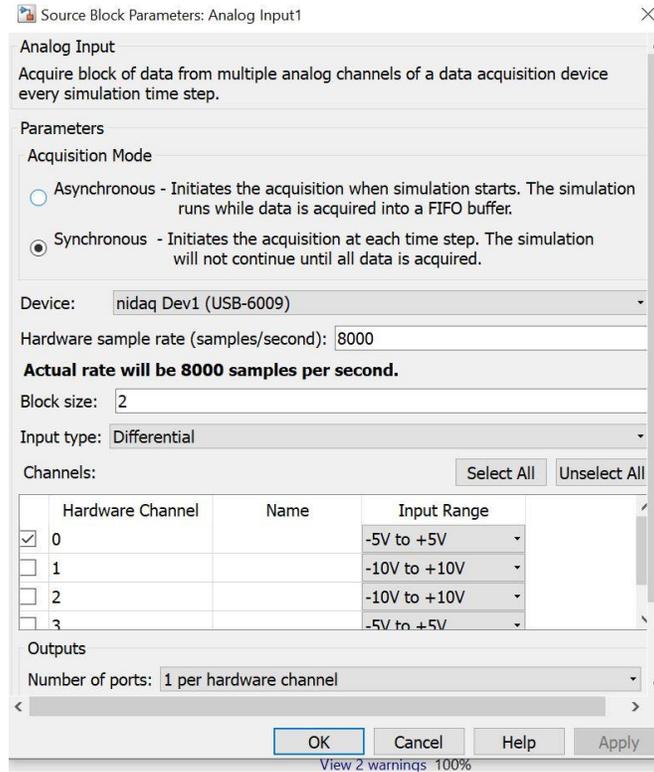


Fig. 60. Configuración de la entrada de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.

Se diseña el diagrama de bloques (ver Fig. 61) que permita apreciar el comportamiento en la entrada y la salida de la tarjeta [14]. La entrada de la tarjeta representa la medición de tensión de la máquina síncrona, en donde el valor de la tensión es un equivalente entre 0 v y 5 v de la tensión en la excitatriz de la máquina. La salida utilizada en la tarjeta de National Instruments, representa la salida del controlador, la cual estará dada por un valor de tensión entre 0 v y 5 v; el valor de tensión que será puesto en la salida de la tarjeta manipulará la señal que es emitida por el microcontrolador en forma de PWM. Finalmente, la variación del PWM ocasionará la variación en la señal de tensión de la excitatriz, la cual variará la señal medida que retroalimenta el sistema.

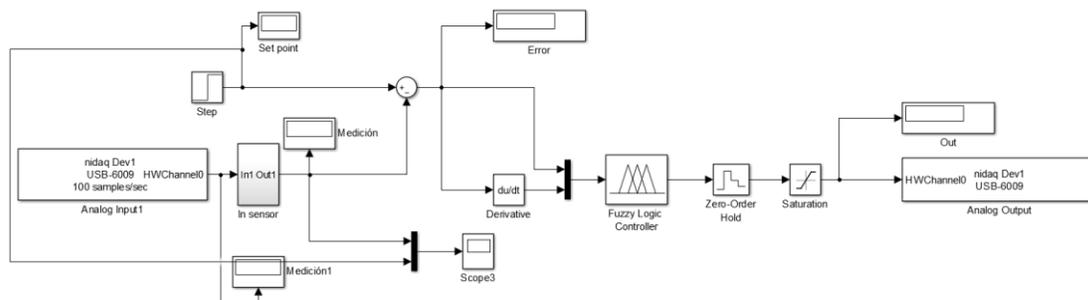


Fig. 61. Esquema utilizado para la implementación de los controladores.

Una vez se conecta todo el sistema como se mencionaba anteriormente (ver Fig. 62), se realiza la puesta en marcha del sistema y la toma de datos del comportamiento de los diferentes controladores.

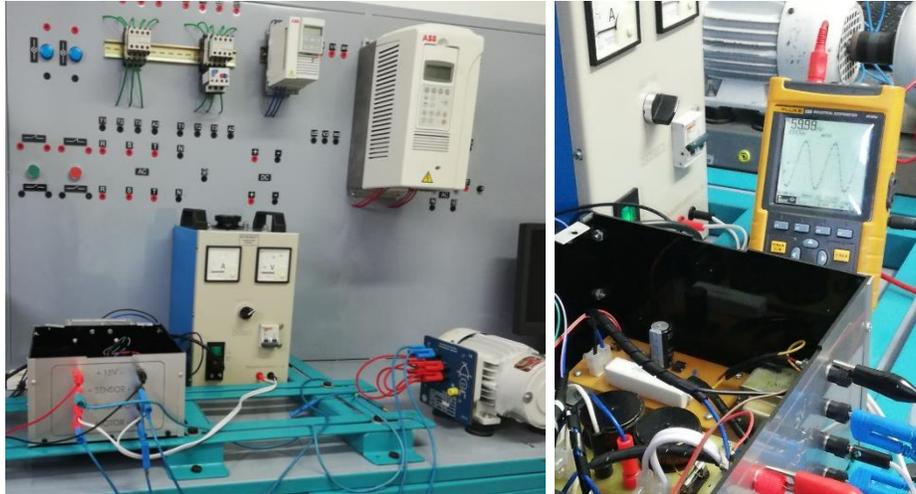


Fig. 62. Sistema máquina síncrona y convertidor DC/DC.

A continuación, se relacionan las respuestas obtenidas para los diferentes controladores diseñados (se muestran las respuestas para 1 controlador de ejemplo para cada tipo de controlador).

Para el controlador tipo fuzzy 3 reglas:

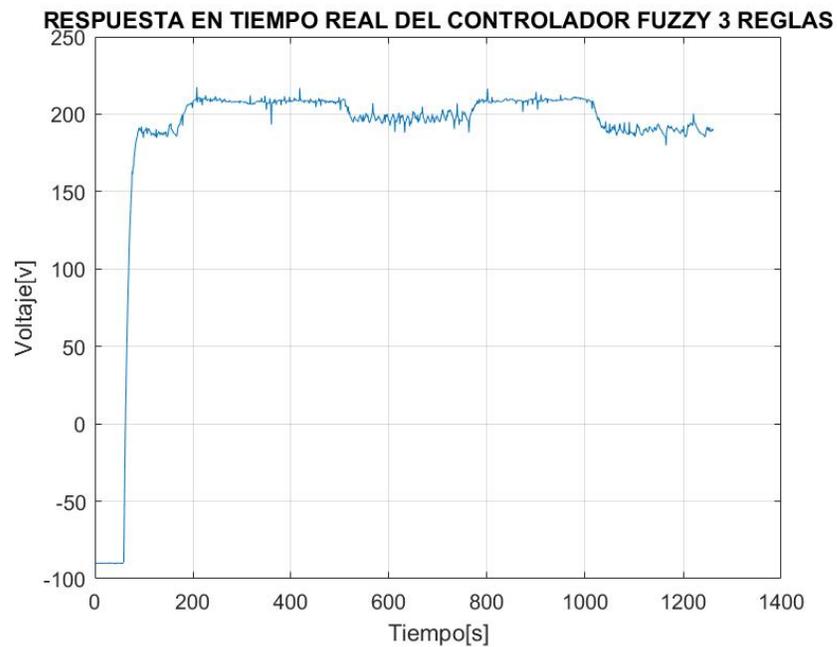


Fig. 63. Respuesta del controlador tipo fuzzy 3 reglas en tiempo real.

Para el controlador tipo fuzzy 5 reglas:

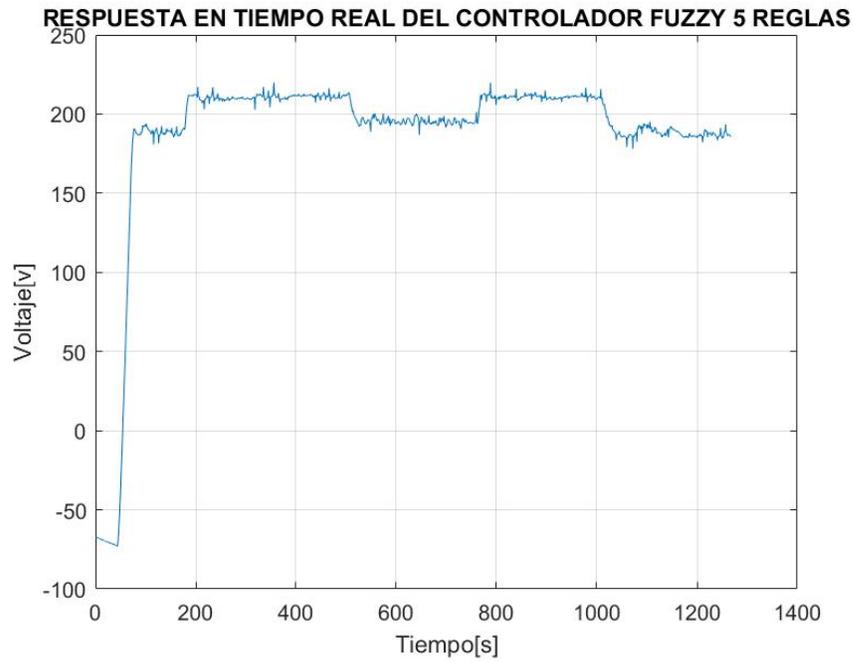


Fig. 64. Respuesta del controlador tipo fuzzy 5 reglas en tiempo real.

Para el controlador tipo fuzzy 7 reglas:

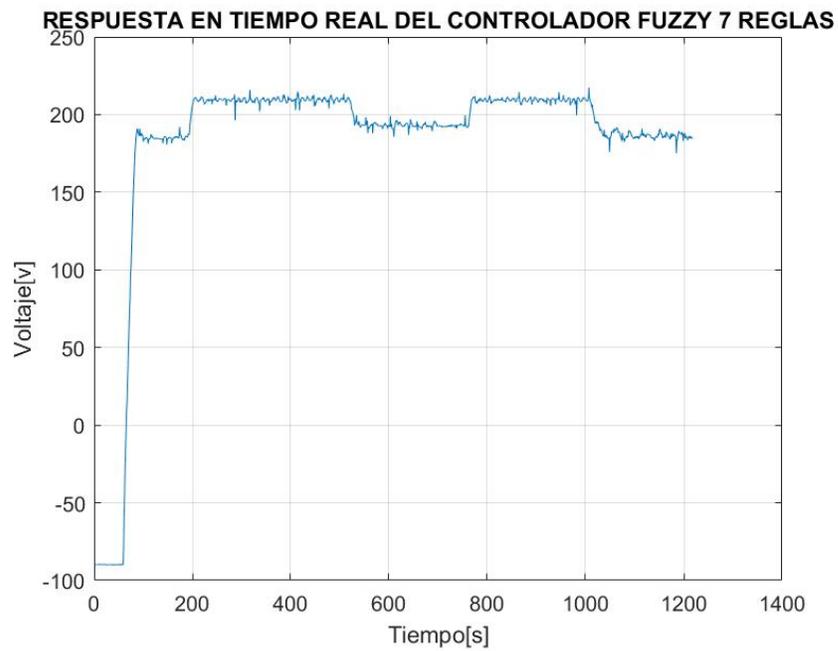


Fig. 65. Respuesta del controlador tipo fuzzy 7 reglas en tiempo real.

Para el sistema de control de la excitatriz de la máquina síncrona utilizando redes neuronales, como se mencionaba anteriormente, se realiza la toma de datos en tiempo real de la entrada y salida de uno de los controladores implementado anteriormente. Las señales utilizadas para el diseño de la red neuronal son el error y la salida de control. El control utilizado para la toma de la data de entrenamiento es el controlador difuso 7 reglas. Una vez entrenada la red se realiza la implementación en tiempo real (ver Fig. 66)

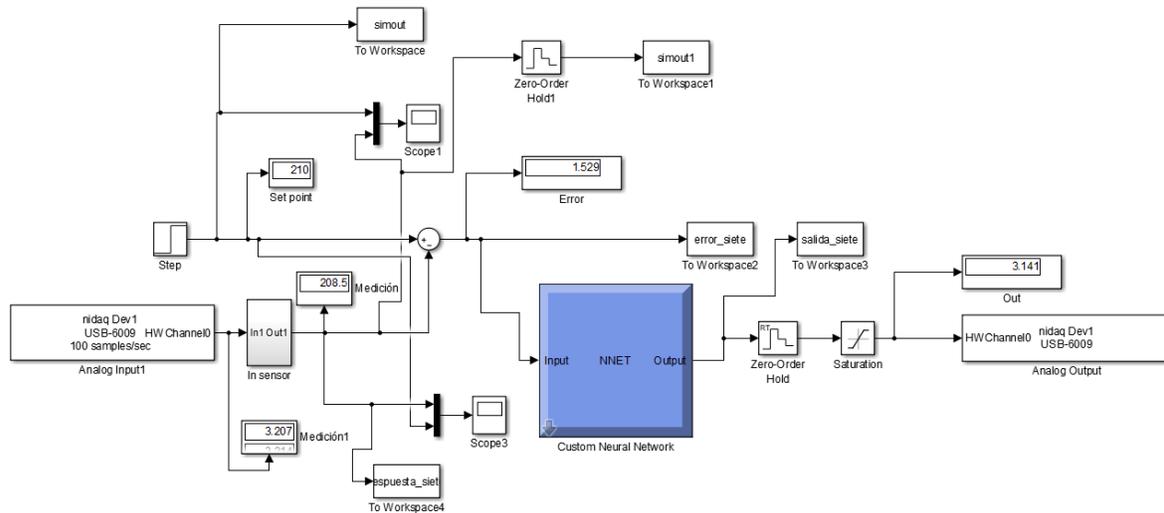


Fig. 66. Implementación de la red neuronal para el control de la excitatriz de la máquina síncrona.

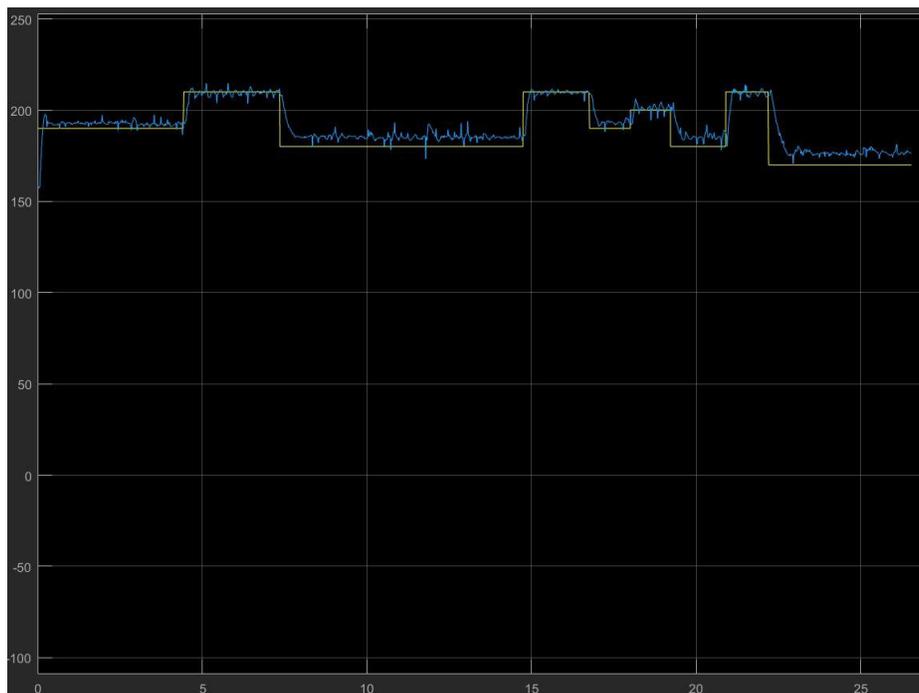


Fig. 67. Respuesta de la red neuronal en tiempo real .

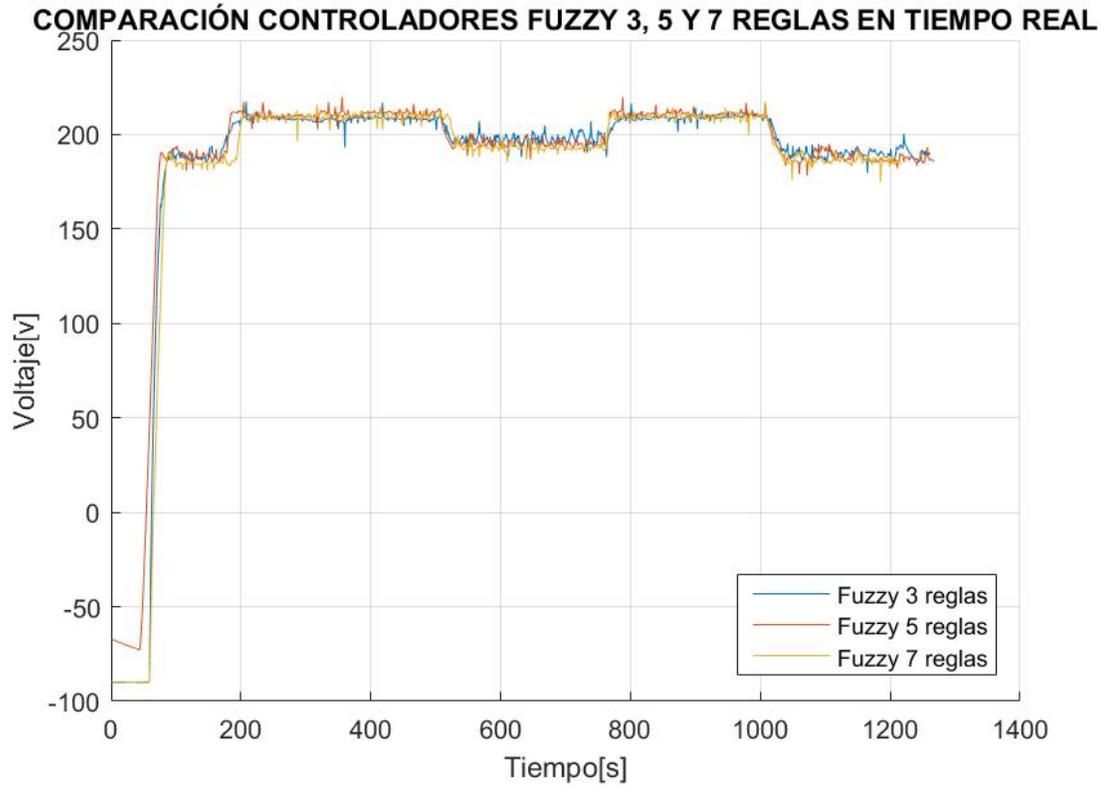


Fig. 68. Respuesta de los controladores tipo fuzzy 3, 5 y 7 reglas.

## 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 3 reglas, 5 reglas y 7 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%.

En relación a la red neuronal utilizada para el emular el comportamiento de la planta, así como la acción de control de los controladores tipo PID y difusos seleccionados entre los controladores diseñados; esta fácilmente evidencia un satisfactorio comportamiento tras el entrenamiento de la red con los puntos establecidos para tal proceso. Es importante resaltar que tanto el proceso de identificación como el de clonación presentaron resultados acertados. A partir de estas afirmaciones finalmente se puede agregar que el uso de las técnicas inteligentes de control y la combinación de las mismas propenden por el mejoramiento de la acción deseada como finalidad misma del diseño de los controladores; incluso, la mezcla de diferentes métodos o estrategias de control brindan robustez al sistema desarrollado.

## REFERENCIAS

- [1] Fajardo, J. (2011). Implementacion De Control De Velocidad De Un Motor Dc Utilizando Lógica Difusa En La Plataforma De Labview. Universidad de san Buenaventura, Cali.
- [2] Alanis, A. Y. (2007). Control Neuronal Discreto: Aplicación a motores de inducción. *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N Unidad Guadalajara*.
- [3] Grisales, J. P. (2013). Importancia de las Máquinas Eléctricas. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia et Technica Año XVIII*
- [4] Farias, A., Bermudez, A., Rojas, R., Rodriguez, J., Herrera, J., Miguez, E., Nuñez, J., Astudillo, C. (2014). Importancia del Conocimiento sobre Máquina Eléctrica para el Mantenimiento Industrial.
- [5] Rodilla, E. (2016). La energía.
- [6] Pacheco, M. (2015). La Energía que Requiere Nuestro Territorio. *ARQ N°69*. (pp. 17-21).
- [7] Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría. (2015). Arquitectura y Urbanismo. *Vol 36 N°1*
- [8] Vargas, F. (1990). Maquinas Electricas Rotativas. *PUC*. Lima, Perú.
- [9] Castañeda, J. G. (2008). Las Máquinas Eléctricas para el Ingeniero en Electrónica.
- [10] Serrano, L., Román, M., (2014). Máquinas Eléctricas. *Editoria Universitat Politecnica de Valencia*.
- [11] Cembranos, F. J. (2014). Motores Síncronos. *Revista Digital de ACTA*. Cedro.(pp. 8-11).
- [12] Muhammad, R., Muhammad H., González, V., Suárez, P.A. . (2004). Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación. (p. 878).
- [13] Abdelkader, K., Kamel, G., Djillali, M. (2014). Spectral decomposition based approach for DC–DC converters modeling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 61, (pp. 288-297).
- [14] 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.
- [15] Ogata, K. (2004). Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, Cuarta edición, Madrid.
- [16] Santos, M. (2011). Aplicaciones exitosas del Control Inteligente a casos reales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informatica Industrial*. Retrieved from [http://www.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/955/files/VII\\_Simposio\\_de\\_Control\\_Inteligente-2011/07\\_ponencia2\\_Santos.pdf](http://www.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/955/files/VII_Simposio_de_Control_Inteligente-2011/07_ponencia2_Santos.pdf)
- [17] Oviedo, U. (n.d.). Diseño de Sistemas Avanzados de Control. Control Fuzzy. Retrieved from [http://isa.uniovi.es/~hilario/dsac\\_archivos/pdf\\_dsac/Fuzzy.pdf](http://isa.uniovi.es/~hilario/dsac_archivos/pdf_dsac/Fuzzy.pdf)
- [18] Kouro, S. (2002). Control Mediante Lógica Difusa. *Técnicas Modernas En Automática*, 1–7. Retrieved from <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- [19] Diciembre, S. (2017). *Sistemas de Control con Logica Difusa: Metodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)*. Universitat Haume. Retrieved from

- [http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173788/TFG\\_2017\\_DiciembreSana\\_huja\\_Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173788/TFG_2017_DiciembreSana_huja_Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [20] 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.
  - [21] Matute, A., Bernal, W. (2017). Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT) | Vol. III*
  - [22] 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.
  - [23] Farouk, N., Sheng, L. (2012). Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controller for Synchronous Generator. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* .
  - [24] Lara, F. (n.d.). Fundamento de Redes Neuronales Artificiales. Laboratorio de Cibernética Aplicada –Centro de Instrumentos. UNAM
  - [25] Poznyak, A.S., Sánchez, E.N and Yu, W. (2001). Differential Neural Networks for Robust Nonlinear Control. World Scientific Publishing Co. (pp. 4-50)
  - [26] 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.
  - [27] Pérez, T., Blanco, E. (2017). Estrategias Pedagógicas en el aula de clase *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
  - [28] 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.
  - [29] 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.
  - [30] 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.
  - [31] 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.
  - [32] Tolosa, C., Eugenio, B. (2017). Desarrollo de Libros Electrónicos: "Taller Pedagógico", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257, 2017.
  - [33] Samacá, L. F., Mesa, L. (2016). Investigación Formativa para Estudiantes de Ingeniería Utilizando Robótica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN:1692-7257