



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Análisis Comparativo Entre Controladores PID y FUZZY-PID Aplicados a Modelo Experimental Obtenido de un Filtro Activo Pasa-Bajos.”

### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

### **MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL**

ING. CARLOS PATRICIO ARROYO VILELA

ING. LAURO FERNANDO SALVATIERRA BRAVO

GUAYAQUIL – ECUADOR

2022

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida.

A mis padres, hermanos e hija, por ser mis pilares fundamentales y haberme apoyado absolutamente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron en el transcurso del camino.

A mi Director de Tesis, M.Sc. Livingston Miranda quien con su conocimiento, experiencia y motivación me guió para la realización de este trabajo.

A mi Profesor Evaluador de Tesis, M.Sc. Ronald Solís que con su aporte, ideas, recomendaciones y observaciones pude cumplir a cabalidad esta tarea.

A nuestro Coordinador de Programa, el PhD. Douglas Plaza G., por su gran apoyo y orientación en todo el proceso de formación y titulación.

Carlos P. Arroyo V.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por todas sus bendiciones y para bienes, así como también a mi querida esposa Lic. Carmen Inés Cagua Quiñónez por su invaluable sacrificio y paciencia que permitieron forjarme a conseguir éste y otros ideales.

A la Escuela Superior Politécnica de Litoral, directivos y docentes por la organización del programa de la Maestría en Control y Automatización Industrial.

Lauro F. Salvatierra B.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios Jehová de los ejércitos por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi hija, Mel Luciana Arroyo Giraldo por ser mi motivación y un pilar importante en mi vida. A mi madre y hermanos por brindarme todo su apoyo moral e incondicional. A mis compañeros y catedráticos de la maestría por su gran estimación y soporte brindado.

Carlos P. Arroyo V.

Dedico este trabajo a Dios, por ser el inspirador que nos otorgó la fuerza y la valentía para culminar este proceso. A mi esposa Carmita por estar siempre presente dándome el impulso y el apoyo moral a seguir adelante con este anhelo mutuo en virtud de respeto y por sobre todas las cosas con mucho amor. A mis padres, ya que con sus enseñanzas de vida y superación me permitieron seguir su ejemplo y convertirme en una persona de bien para la sociedad.

Lauro F. Salvatierra B.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**Ph.D. MARIA ALVAREZ**

**SUB-DECANO FIEC**

---

**M.Sc. LIVINGTON MIRANDA D.**

**DIRECTOR**

---

**M.Sc. RONALD SOLIS.**

**VOCAL PRINCIPAL**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.

---

Ing. Carlos Patricio Arroyo V.

---

Ing. Lauro Fernando Salvatierra B.

## RESUMEN

Este documento presenta un análisis de desempeño entre dos tipos de controladores que se aplican para regular la amplitud de la salida en un filtro pasa-bajos de segundo orden cuyo modelo fue obtenido previamente de manera experimental.

El modelo fue obtenido por el autor Tamayo, Juan [2] que en su trabajo obtuvo la función de transferencia que corresponde al comportamiento del sistema en lazo abierto. De acuerdo a sus características este es un sistema tipo SISO (single input, single output)

Aplicamos las técnicas de control regulatorio aplicadas a un sistema de control en tiempo continuo usando el software de ingeniería Matlab- Simulink® dentro del cual escogimos la herramienta sisotool para diseñar el controlador clásico tipo PID.

Una vez obtenido el controlador PID, se han utilizado las técnicas de Control Inteligente para diseñar un controlador Fuzzy-PID tipo Mamdani donde se definió dos variables de entradas: error de la posición y error de la velocidad, y una variable de control de salida además de las reglas de operación basadas en la experiencia lógica de funcionamiento del filtro activo pasa-bajos.

Ambos controladores fueron implementados sobre el modelo obtenido de manera experimental para un filtro activo pasa-bajos que es parte de un sistema de adquisición de señales eléctricas.

Finalmente, luego de implementar ambos controladores en Matlab-Simulink®, y evaluar sus índices de desempeño y su respuesta ante perturbaciones externas al sistema se observó que el controlador Fuzzy-PID tiene mejor rendimiento que el controlador clásico PID sobre el modelo del filtro activo pasa-bajos.

**Palabras claves:** Filtro activo, Filtro pasa-bajos, Control PID, Control Fuzzy-PID.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....</b>	<b>V</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
<b>CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Identificación del problema.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Justificación.....</i>	<i>1</i>
1.3 <i>Solución Propuesta.....</i>	<i>2</i>
1.4 <i>Objetivos de la Tesis.....</i>	<i>3</i>
1.4.1 <i>Objetivos Generales.....</i>	<i>3</i>
1.4.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>3</i>
1.5 <i>Metodología.....</i>	<i>4</i>
1.6 <i>Alcance.....</i>	<i>4</i>
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Conceptos de Filtros.....</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Fundamento de filtro pasa-bajos.....</i>	<i>7</i>
2.3 <i>Obtención del modelo del filtro pasa-bajos.....</i>	<i>9</i>
2.4 <i>Controlador lógico Fuzzy.....</i>	<i>13</i>
<b>CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONTROLADORES PID Y PID-FUZZY.....</b>	<b>16</b>
3.1 <i>Diseño del controlador PID basado en modelo.....</i>	<i>16</i>
3.2 <i>Diseño del controlador FUZZY- PID.....</i>	<i>20</i>
3.3 <i>Parametrización y ajuste del controlador FUZZY - PID.....</i>	<i>24</i>



CAPITULO 4 SIMULACION Y COMPARAION DE CONTROLADORES.....	40
4.1 Aplicación de controlador PID a modelo de filtro pasa-bajos.....	40
4.2 Aplicación de controlador Fuzzy-PID a modelo de filtro pasa-bajos.....	42
4.3 Análisis comparativo entre controlador PID y Fuzzy-PID.....	43
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS.....	51
1. Programa de Matlab.....	51

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

$\omega$	Frecuencia en rad / s.
$\omega_c$	Frecuencia de corte
$\omega_1$	Frecuencia de corte inferior
$\omega_2$	Frecuencia de corte superior
$A_{CL}$	Ganancia de lazo cerrado
C1, C2	Capacitor
$E_i$	Voltaje de entrada
Ess	Error en estado estable
$e(t)$	Error
FPB	Filtro Pasa bajo
FLC	Controlador lógico Fuzzy
$H(j\omega)$	Ganancia en amplitud de señal
I/O	Entradas / Salidas
In-ref	Entrada de referencia
j	$\sqrt{-1}$
Kp	constante proporcional de controlador PID
Ki	constante integral de controlador PID
Kd	constante derivativa de controlador PID
Out-PID	Respuesta con controlador PID
Out-Fuzzy-PID	Respuesta con controlador Fuzzy-PID
OS%	Sobrenivel porcentual
PID	Proporcional integral derivativo
rad	radianes
R, R1,R2,R3,R4	Resistencia
$R_f$	Resistencia de realimentación
RMSE	Error cuadrático medio
sec	segundo
SISO	Sistema con una entrada y una salida
S-ref	Señal de referencia para el controlador
S-filtered	Señal de referencia para el controlador
Tss	Tiempo de estabilización
$V_o$	Voltaje de salida

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-bajos.....	5
Figura 2.2. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-altos [6].....	6
Figura 2.3. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-banda [6]. ....	6
Figura 2.4. Respuesta ideal en frecuencia para filtro rechaza-banda [6]. ....	7
Figura 2.5. Circuito de un filtro activo pasa-bajos [5].....	7
Figura 2.6. Respuesta real de un filtro activo pasa-bajos [ 6].....	8
Figura 2.7. Esquemático del filtro activo pasa-bajos de segundo orden. ....	9
Figura 2.8. Respuesta del sistema al escalón unitario. ....	10
Figura 2.9. Características de respuesta al escalón unitario. ....	11
Figura 2.10. Validación de modelo obtenido. ....	12
Figura 2.11. Estructura de controlador Fuzzy [8]. ....	15
Figura 3.1. Simulación del sistema usando Matlab - Simulink®.....	17
Figura 3.2. Respuesta del sistema ante escalón unitario. ....	17
Figura 3.3. Requerimientos de diseño en sisotool.....	18
Figura 3.4. Características de la respuesta del controlador C1 .....	19
Figura 3.5. Diseñador de controlador Fuzzy.....	23
Figura 3.6. Selección del controlador Fuzzy tipo Mamdani... ..	24
Figura 3.7. Implementación de entrada error de posición muy negativo. ....	25

Figura 3.8. Implementación de entrada error de posición negativo. ....	26
Figura 3.9. Implementación de entrada error de posición cero. ....	27
Figura 3.10. Implementación de entrada error de posición positivo. ....	28
Figura 3.11. Implementación de entrada error de posición muy positivo. ....	29
Figura 3.12. Implementación de entrada error de velocidad muy negativo ..	30
Figura 3.13. Implementación de entrada error de velocidad negativo.....	31
Figura 3.14. Implementación de entrada error de velocidad cero. ....	32
Figura 3.15. Implementación de entrada error de velocidad positivo .....	33
Figura 3.16. Implementación de entrada error de velocidad muy positivo ...	34
Figura 3.17. Implementación de salida de voltaje negativo. ....	35
Figura 3.18. Implementación de salida de voltaje cero. ....	36
Figura 3.19. Implementación de salida de voltaje positivo. ....	37
Figura 3.20 Implementación de reglas lógicas del controlador Fuzzy. ....	38
Figura 3.21. Validación de aplicación de reglas del controlador Fuzzy". ....	39
Figura 3.22. Superficie de control para controlador Fuzzy". ....	39
Figura 4.1. Modelo de implementación del controlador PID. ....	40
Figura 4.2. Respuesta del sistema con controlador PID. ....	41
Figura 4.3. Señal de error y salida del controlador de voltaje PID.....	41
Figura 4.4. Modelo de implementación del controlador Fuzzy-PID .....	42

Figura 4.5. Respuesta del sistema con controlador Fuzzy-PID.....	42
Figura 4.6. Señal de error y salida del controlador Fuzzy-PID. ....	43
Figura 4.7. Respuesta del sistema con controlador PID. ....	44
Figura 4.8. Respuesta del sistema con controlador Fuzzy-PID.....	45
Figura 4.9. Perturbación externa al sistema. ....	46
Figura 4.10. Respuesta de los controladores ante una perturbación. ....	47
Figura 4.11. Señales de controladores frente a la perturbación.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros eléctricos de filtro pasa-bajos.....	10
Tabla 2: Parámetros eléctricos de filtro pasa-bajos.....	11
Tabla 3: Parámetros de sistema de adquisición de datos. ....	12
Tabla 4: Requerimiento de diseño para controlador PID.....	18
Tabla 5: Reglas de lógica difusa para controlador Fuzzy .....	21
Tabla 6: Características de error de posición muy negativo.....	25
Tabla 7: Características de error de posición negativo. ....	26
Tabla 8: Características de error de posición cero. ....	27
Tabla 9: Características de error de posición positivo. ....	28
Tabla 10: Características de error de posición muy positivo. ....	29
Tabla 11: Características de error de velocidad muy negativo.....	30
Tabla 12: Características de error de velocidad negativo.....	31
Tabla 13: Características de error de velocidad cero. ....	32
Tabla 14: Características de error de velocidad positivo. ....	33
Tabla 15: Características de error de velocidad muy positivo. ....	34
Tabla 16: Características de salida de voltaje negativo .....	35
Tabla 17: Características de salida de voltaje cero. ....	36
Tabla 18: Características de salida de voltaje positivo. ....	37
Tabla 19: Índices de desempeño para controlador PID. ....	44
Tabla 20: Índices de desempeño para controlador Fuzzy-PID.....	45
Tabla 21: Índices de Desempeño de Controladores PID y Fuzzy-PID.....	46

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, con el desarrollo de la electrónica industrial moderna se ha visto la necesidad de filtrar y acondicionar las diferentes señales eléctricas para obtener de manera más fiable su información y de esta manera mejorar su procesamiento dentro de los sistemas de control.

En este caso seleccionamos un filtro activo pasa-bajo de segundo orden cuya arquitectura se basa en dos etapas de circuitos amplificadores operacionales, cuyo modelo se ha obtenido experimentalmente lo cual es el elemento diferenciador de nuestro trabajo.

Hemos escogido este tipo de sistemas ya que son ampliamente aplicados a nivel industrial para acondicionamiento de señales de instrumentación y control, que son la base de los dispositivos electrónicos de adquisición y tratamiento de datos.

Los principales fundamentos sobre filtros activos han sido ampliamente desarrollados y explicados por el autor Cabrera Peña, José dentro de lo cual hemos seleccionado el filtro activo pasa-bajos [1] sobre el cual realizaremos la implementación de dos tipos de controladores (PID y Fuzzy-PID).

El autor Tamayo, Juan presentó el diseño e implementación de controladores digitales a través de un sistema de adquisición de datos en el cual realizó la implementación de un filtro activo pasa-bajos [2]. En su trabajo realizó la identificación del sistema utilizando la herramienta informática System Identification Toolbox del software Matlab-Simulink® donde se obtuvo un modelo y su función de transferencia correspondiente.

Como trabajo previo los autores S. S. Patil, G. M. Malwatkar y J. V. Kulkarni realizaron la mejora del rendimiento en el rechazo de perturbaciones mediante el controlador PID en serie con filtro pasa-bajos [3], donde se demuestra que el rendimiento del controlador puede ser mejorado modificando los parámetros del filtro.

Adicionalmente los autores Martínez Ulises et al, desarrollaron un control PID convencional con filtro pasa-bajos para el control de velocidad de un motor de CD [4]. La utilización del método por asignación de polos resulta útil para la sintonización del controlador PID ya que el error en la velocidad resulta mínimo, teniendo resultados aceptables.

Como complemento a los trabajos descritos anteriormente, queremos desarrollar un controlador Fuzzy-PID y realizar la comparación de su rendimiento con respecto al rendimiento de un controlador PID convencional aplicados a un filtro activo pasa-bajos para determinar los índices de desempeño y su repuesta ante las posibles perturbaciones que se presenten en el sistema.

En primer lugar, se justifica aplicar un controlador clásico PID sobre el filtro pasa-bajos, el cual es ampliamente usado porque su operación responde directamente sobre el comportamiento del error y debido a esto facilita su comprensión y sintonización de sus parámetros.

Se justifica también, el uso del controlador inteligente (Fuzzy-PID) ya que su principal característica es que se fundamenta en reglas lógicas, lo que permite un mejor entendimiento de su funcionamiento y además se puede anticipar el resultado de su comportamiento ante la señal del error lo que facilita su aplicación para enfrentar el problema descrito anteriormente.

Por lo anterior expuesto, se requiere realizar el desarrollo y la sintonización de ambos controladores aplicado sobre el sistema de filtros pasa-bajos y determinar cual de ellos presenta un mejor rendimiento utilizando para ello los resultados obtenidos en sus índices de desempeño.



# CAPÍTULO 1

## PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

### 1.1 Identificación del problema

Durante el funcionamiento de un filtro activo pasa-bajos de segundo orden, se observa que se presentan algunos indicadores no favorables, como una respuesta de tipo subamortiguada, un alto tiempo de estabilización en su salida y una ganancia baja de estado estacionario.

En la simulación del modelo experimental obtenido se muestra un sobrenivel porcentual alrededor del 25%, un tiempo de estabilización de 11s y una ganancia baja de estado estacionario de 0.5.

Por lo anteriormente descrito, pretendemos enfrentar este problema, mejorando la respuesta de este sistema aplicando técnicas de control convencional (PID) y técnicas de control de lógica difusa (FUZZY-PID). Finalmente vamos a analizar y determinar cuál tipo de controlador nos brinda un mejor desempeño para este tipo de sistemas, en términos de una mejor regulación del voltaje de salida y mejor rechazo ante las perturbaciones.

### 1.2 Justificación

Con el incremento del uso de la electrónica digital y la implementación de los microprocesadores en los últimos años, se ha favorecido el procesamiento digital de señales, para dar solución a diferentes necesidades en los campos de aplicación de las comunicaciones, electromedicina, automatización y control industrial.

El funcionamiento de un sistema de adquisición de datos se fundamenta en un sensor que captura una señal análoga y luego esta señal debe ser acondicionada para su posterior conversión y procesamiento digital. Es justamente en esta etapa de acondicionamiento donde hoy en día se incorporan los filtros activos para eliminar los ruidos electromagnéticos de alta frecuencia que pueden estar afectando la precisión de la información que se desea medir.

Los filtros activos son sistemas que permiten el paso de señales eléctricas a un rango de frecuencias determinadas e impide el paso del resto. Sin embargo, en comparación con la respuesta de un filtro ideal, los filtros activos adolecen de los siguientes defectos:

- La transición entre la banda que se quiere dejar pasar y la que se quiere eliminar no es abrupta, sino que tiene una determinada pendiente que depende del número de orden del filtro.
- La respuesta de fase no es lineal, por lo que se disminuye la amplitud de la señal analógica cuando pasa por el filtro.

Por lo anterior expuesto, es que hemos propuesto resolver la problemática de la pérdida de amplitud del voltaje de una señal eléctrica acondicionada por un filtro activo pasa-bajos de segundo orden basado en un modelo obtenido experimentalmente.

Para desarrollar nuestro trabajo, hemos utilizado el análisis comparativo entre dos tipos de controladores como lo son el controlador PID clásico y el controlador Fuzzy-PID los cuales fueron aplicados sobre el sistema descrito anteriormente para determinar cual de ellos nos brinda los mejores resultados basándonos en sus índices de desempeño.

### **1.3 Solución Propuesta**

Para enfrentar el problema descrito en la sección anterior, hemos implementado un controlador Fuzzy-PID aplicado sobre el filtro pasa-bajo experimental de segundo orden. El uso de reglas lógicas puede ayudar a determinar una mejor respuesta para el sistema de control de amplitud de voltaje, en comparación de un controlador de amplitud de voltaje tipo PID clásico.

## **1.4 Objetivos de la Tesis**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Analizar el desempeño de los controladores tipo clásico (PID) y tipo inteligente con lógica difusa (Fuzzy-PID) aplicados a un modelo obtenido experimentalmente de un filtro activo pasa-bajos para determinar con cuál de estos controladores obtenemos una mejor regulación del voltaje de salida y un mejor rechazo ante las perturbaciones.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Describir el principio de funcionamiento de un filtro activo pasa-bajos y sus elementos constitutivos para la obtención de su función de transferencia y comprensión de la dinámica de respuesta del sistema.
- Analizar la respuesta del modelo del filtro activo pasa-bajos ante una entrada escalón unitario utilizando el software Matlab Simulink®.
- Diseñar los controladores tipo PID y tipo Fuzzy-PID para la regulación de la respuesta de salida ante una entrada escalón-unitario, usando las herramientas sisotool y Fuzzy logic designer del software Matlab.
- Realizar el análisis comparativo de los controladores propuestos aplicados sobre el modelo del filtro pasa-bajos basado en sus índices de desempeño y su respuesta ante las perturbaciones.

## **1.5 Metodología**

Para la realización de esta propuesta nos basamos en el filtro activo pasa-bajos que fue implementado por el autor Juan Tamayo [2] donde se realizó la identificación del sistema y se obtuvo un modelo para este filtro.

Para analizar la respuesta de este filtro activo pasa-bajo de segundo orden, vamos a utilizar como herramienta principal el software de ingeniería Matlab-Simulink®.

Una vez que hayamos procedido a realizar la simulación del circuito propuesto determinaremos cual es el modelo que representa el comportamiento de este sistema, con el objetivo de encontrar la función de transferencia que relaciona la variable de ingreso de voltaje,  $V_{in}$  con la variable de salida de voltaje,  $V_{out}$ .

A continuación, aplicaremos las técnicas de control regulatorio para desarrollar un controlador tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) y un controlador inteligente Fuzzy-PID que serán aplicados al sistema y determinaremos sus parámetros de rendimiento.

Finalmente, la implementación del modelo descrito y el diseño de los controladores propuestos serán desarrollados bajo la plataforma computacional Matlab-Simulink® con el objetivo de validar la respuesta obtenida del modelo y realizar el análisis comparativo del rendimiento de ambos controladores.

Una vez ejecutada la simulación obtendremos los parámetros de los controladores diseñados, para lo cual vamos a utilizar los siguientes índices de desempeño: Tiempo de Levantamiento (s), Sobrenivel Porcentual (%), Tiempo de Estabilización (s), Variable de Control (%) y métricas relacionadas al comportamiento del error.

## **1.6 Alcance**

El presente trabajo abarcó el planteamiento y desarrollo de los controladores, PID clásico y Fuzzy-PID por medio de herramientas teóricas y computacionales en Matlab-Simulink® aplicados sobre el modelo experimental de un filtro activo de segundo orden para determinar cuál de ellos presentaba un mejor rendimiento basado en sus índices de desempeño y respuesta ante perturbaciones.

Una vez que se realizó la implementación de ambos controladores sobre el modelo experimental del filtro pasa-bajos, se observó que el controlador Fuzzy-PID presentó mejores índices de desempeño en comparación a un controlador regulatorio tipo PID.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1 Concepto de Filtros

Un filtro es un circuito diseñado para dejar pasar una banda de frecuencias especificada, mientras atenúa todas las señales fuera de esta banda. Los circuitos de filtros pueden ser activos o pasivos, según lo describen en su trabajo los autores Coughlin et al, [5].

Los circuitos de filtros pasivos contienen solo resistores, inductores y capacitores. Los filtros activos emplean transistores o amplificadores operacionales más resistores, inductores y capacitores. Los inductores no se utilizan a menudo en los filtros activos, debido a que son voluminosos, costosos y pueden tener componentes resistivos grandes de acuerdo a lo que indica el autor F.Miraya [6].

De acuerdo a su función de transferencia existen cuatro tipos de filtros: pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda y elimina banda (también conocidos como filtros rechaza banda o de muesca).

#### Filtro pasa-bajos

El filtro pasa-bajos permite el paso de las frecuencias menores que cierta frecuencia  $\omega_c$ , denominada frecuencia de corte (frecuencia superior de corte) y bloquea las frecuencias mayores, como se muestra en la figura 2.1.

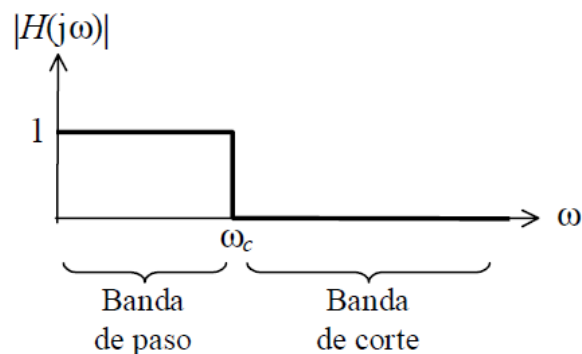


Figura 2.1. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-bajos [6].

### Filtro pasa-altos

El filtro pasa-altos permite el paso de las frecuencias mayores que cierta frecuencia  $\omega_c$ , denominada frecuencia de corte (frecuencia inferior de corte) y bloquea las frecuencias menores, como se muestra en la figura 2.2.

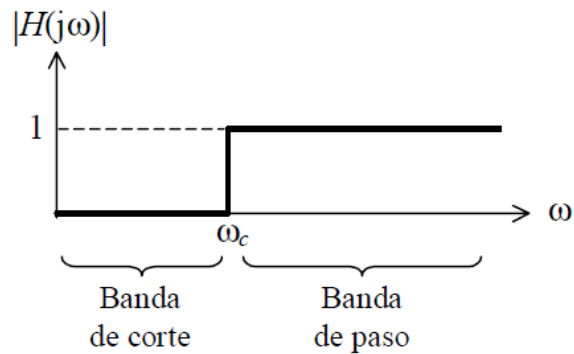


Figura 2.2. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-altos [6].

### Filtro pasa-banda

El filtro pasa-banda permite el paso de las frecuencias comprendidas entre dos frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , donde  $\omega_1 < \omega_2$  y denominadas frecuencia inferior de corte y frecuencia superior de corte, bloqueando las restantes como se muestra en la figura 2.3.

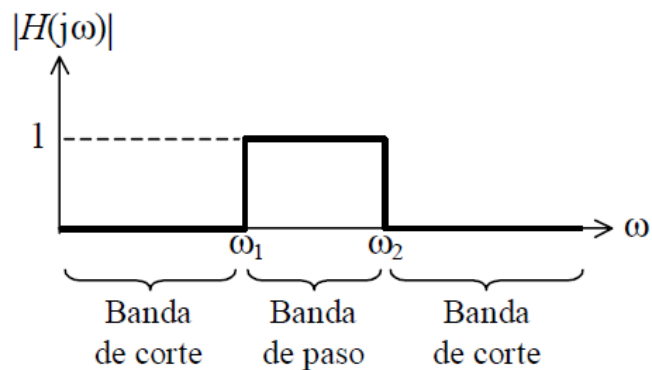


Figura 2.3. Respuesta ideal en frecuencia para filtro pasa-banda [6].

### Filtro rechaza-banda

El filtro rechaza-banda bloquea las frecuencias comprendidas entre las frecuencias de corte  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , donde  $\omega_1 < \omega_2$  dejando pasar las frecuencias restantes como se muestra en la figura 2.4.

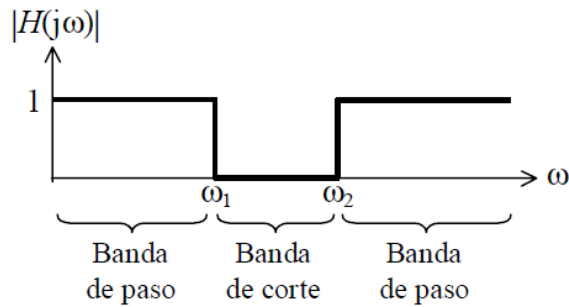


Figura 2.4. Respuesta ideal en frecuencia para filtro rechaza-banda [6].

### 2.2 Fundamento de filtro activo pasa-bajos

El circuito de la figura 2.5 es un filtro activo pasa-bajos de uso común. El filtrado se hace con el circuito RC y el amplificador operacional se utiliza como amplificador de ganancia unitaria. La resistencia  $R_f$  es igual a R y se incluye para la desviación de cd. La reactancia capacitiva es infinita y la trayectoria de resistencia de cd a tierra para ambas terminales de entrada debe ser igual [5].

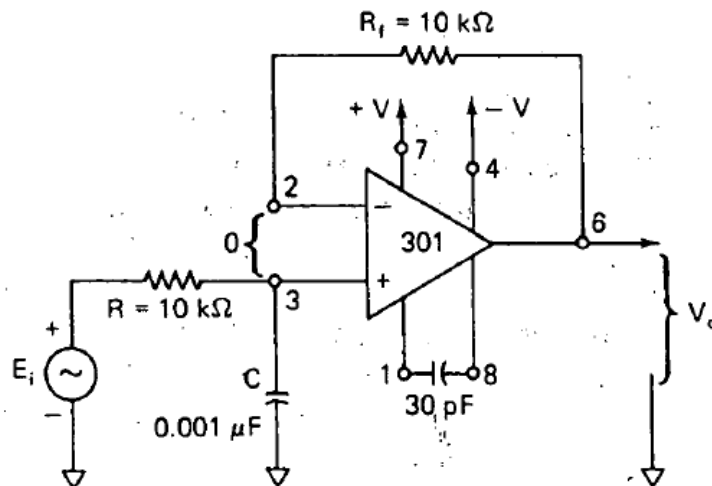


Figura 2.5. Circuito de un filtro activo pasa-bajos [5].

El voltaje diferencial entre las entradas es en esencia 0V. Por tanto, el voltaje a través del capacitor C, es igual al voltaje de salida  $V_o$ , debido a que este circuito es un seguidor de voltaje  $E_i$  es dividido entre R y C. El voltaje en el capacitor es igual a  $V_o$  y se describe en la siguiente ecuación.

$$V_o = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} \times E_i \quad (1)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de  $E_i$  en radianes por segundo ( $\omega = 2\pi f$ ) y j es igual a  $\sqrt{-1}$ . Ordenando la ecuación (1) podemos obtener la ganancia de voltaje en lazo cerrado,  $A_{CL}$  descrita en la siguiente ecuación.

$$A_{CL} = \frac{V_o}{E_i} = \frac{1}{1 + j\omega C} \quad (2)$$

Para mostrar que el circuito de la figura 2.5 es un filtro pasa-bajos considere como varia  $A_{CL}$  en la ecuación conforme cambia la frecuencia. A frecuencias muy bajas, esto es conforme  $\omega$  se aproxima a 0,  $|A_{CL}| = 1$  y a muy altas frecuencias, conforme  $\omega$  se aproxima a infinito,  $|A_{CL}| = 0$ . Esta respuesta se observa en la figura 2.6

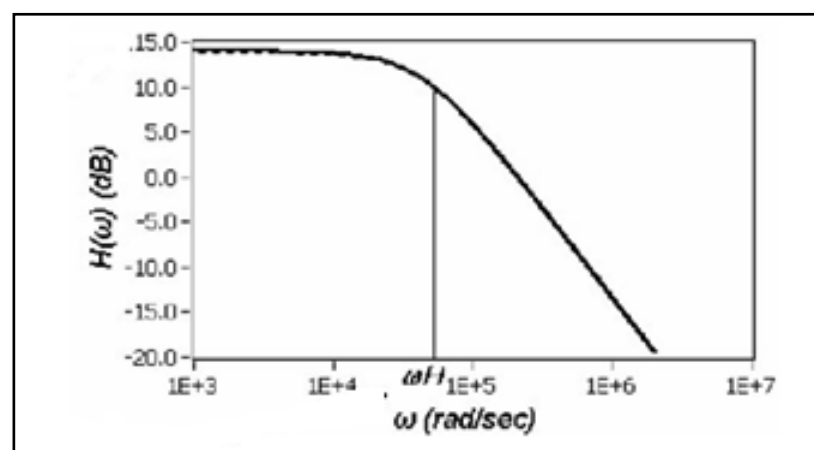


Figura 2.6. Respuesta real de un filtro activo pasa-bajos [ 6].



### 2.3 Obtención del modelo del filtro pasa-bajos

Para la realización de nuestra tesis nos hemos basado en el modelo obtenido experimentalmente de un filtro activo pasa-bajos el cual fue desarrollado en el trabajo realizado por el autor Tamayo, Juan [2] utilizando la técnica de identificación de sistemas.

La obtención de un modelo a partir de datos experimentales se fundamenta en las siguientes etapas: la recolección de datos, la selección del modelo y la validación del modelo.

Para realizar el proceso de identificación a través del System Identification Toolbox de Matlab se replicó el filtro activo pasa-bajos de segundo orden mediante el uso de amplificadores operacionales.

En la figura 2.7 se muestra el diagrama esquemático del filtro activo pasa-bajos de segundo orden que hemos replicado de acuerdo al trabajo citado anteriormente.

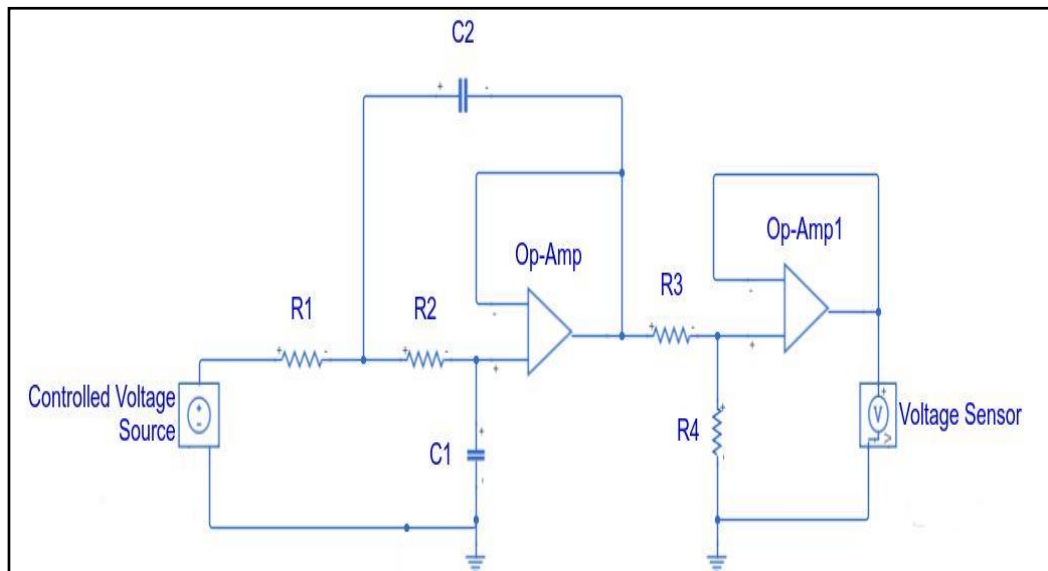


Figura 2.7. Esquemático del filtro activo pasa-bajos de segundo orden.

Los elementos, parámetros y unidades correspondientes al sistema implementado en el circuito del filtro pasa-bajos se muestran en la tabla 1.

Elemento	Parámetro	Unidad
Resistencia [R1]	100	k $\Omega$
Resistencia [R2]	100	k $\Omega$
Resistencia [R3]	10	k $\Omega$
Resistencia [R4]	10	k $\Omega$
Capacitor [C1]	4.7	$\mu$ F
Capacitor [C2]	20	$\mu$ F

Tabla 1: Parámetros eléctricos de filtro pasa-bajos.

Con estos parámetros, realizamos la implementación del circuito propuesto por medio de la herramienta Matlab-Simulink® y se utilizó una fuente DC para alimentar al sistema con una señal escalón unitario luego de lo cual se obtuvo la respuesta que se muestra en la figura 2.8.

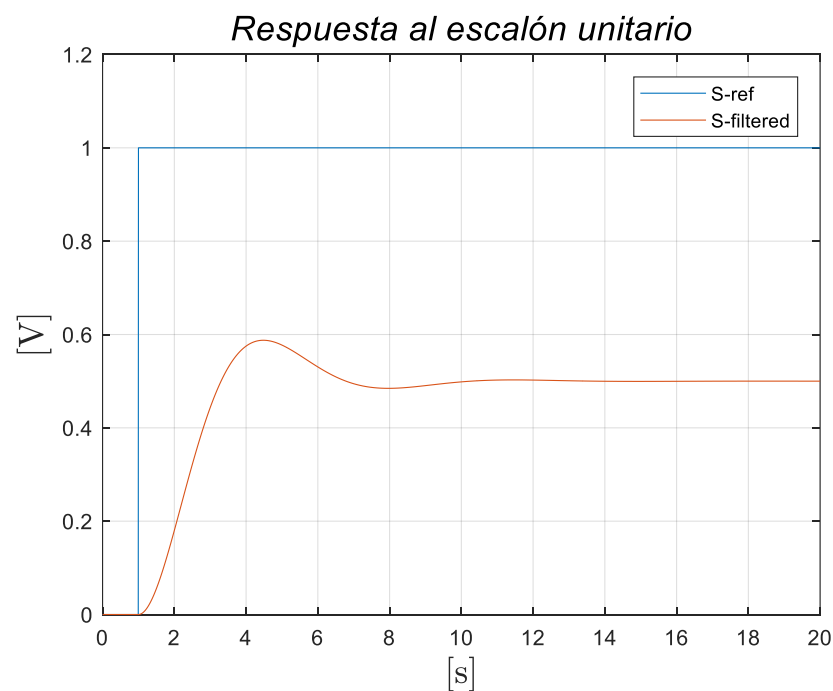


Figura 2.8. Respuesta del sistema al escalón unitario.

Luego de la implementación, se realizó el análisis de la respuesta del sistema usando la herramienta sisotool, según lo recomiendan los autores Chee Pin Tan et al, [7], ante la entrada escalón unitario, el cual se muestra en la figura 2.9.

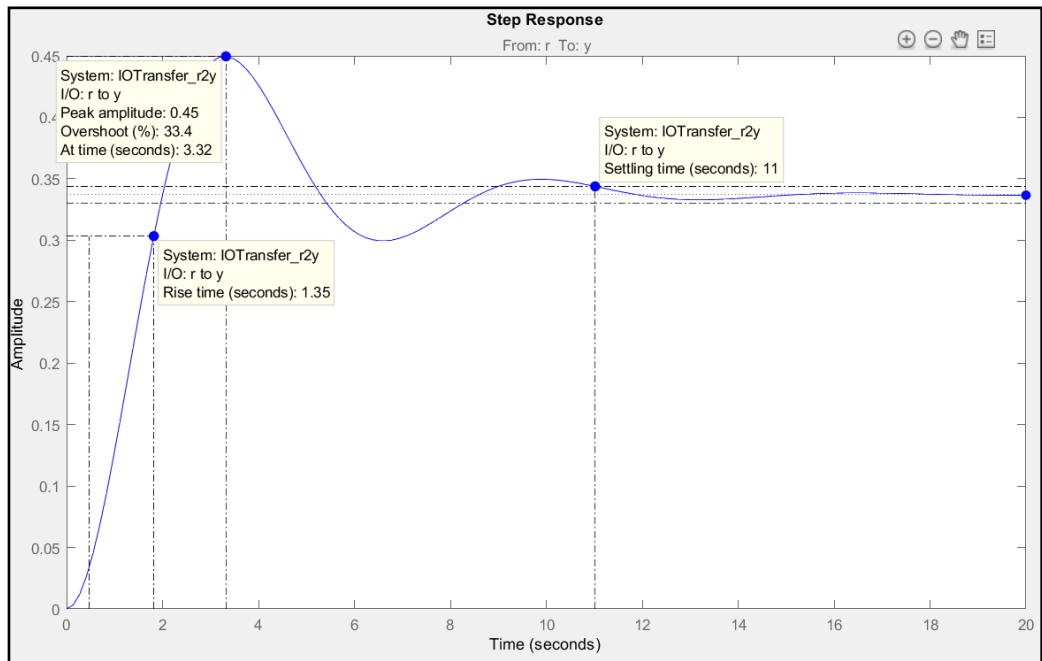


Figura 2.9. Características de respuesta al escalón unitario.

A continuación, se obtuvieron los valores de las principales características de la respuesta del sistema (filtro pasa-bajos de segundo orden) ante una entrada tipo escalón unitario, los cuales se detalla en la tabla 2.

Características	Valor [Unidad]
Tiempo de Levantamiento	1.35 [s]
Sobrenivel Porcentual	33.4 [%]
Tiempo de Estabilización	11 [s]

Tabla 2: Parámetros eléctricos de filtro pasa-bajos.

El autor Tamayo, Juan [2] describe que realizó la adquisición de datos del sistema utilizando para ello los parámetros detallados en la tabla 3.

Datos de adquisición	Valor [Unidad]
Ciclo de trabajo	50 [%]
Tiempo de estabilización (Ts)	11 [s]
Tiempo de muestreo	0.2 [s]
Periodo de excitación (Te =4xTs)	44 [s]
Tiempo total de muestreo (4xTe)	176 [s]

Tabla 3: Parámetros de sistema de adquisición de datos.

Una vez que se aplicaron las técnicas necesarias y utilizando la herramienta *System identification Toolbox* del software de ingeniería Matlab, se pudo obtener el siguiente modelo

$$H(s)_{ident} = \frac{0.34341}{s^2 + 0.6654s + 0.6754} \quad (3)$$

Una vez obtenido el modelo se ha realizado la validación del mismo obteniendo como resultado una aproximación del 95.75%, es decir un error del 4.25% con respecto al modelo real, esta validación se muestra en la figura 2.10

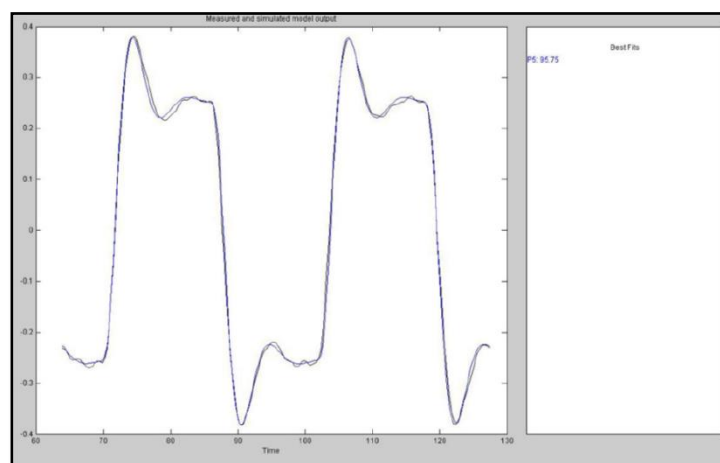


Figura 2.10. Validación de modelo obtenido.

## 2.4 Controlador lógico Fuzzy.

Una de las teorías de control inteligente aplicada en modelos matemáticos es el control lógico difuso (FLC). Este tipo de controladores, se ha aplicado con eficacia en procesos complejos que pueden ser controlados por un operador calificado sin el conocimiento de su dinámica interna.

Se vio la necesidad de aplicar un controlador difuso ya que nos permiten trabajar con valores lingüísticos como entradas, en sistemas donde los valores de las entradas varían en un determinado rango o son difíciles de estimar.

Es muy común que el principio de funcionamiento de un proceso esté basado en reglas definidas, sin embargo, estas pueden contener imprecisiones que aparecen en la descripción de las reglas dadas por el experto. Debido a eso los autores Mamdani, E. H., & Assilian, S. [8] determinaron una regla de inferencia llamada "regla de composición de inferencia" lo cual es el fundamento de lo que hoy conocemos como controlador Fuzzy tipo Mamdani.

### Controlador Fuzzy tipo Mamdani

La técnica de inferencia difusa más utilizada es el llamado método Mamdani. y como primer intento fue controlar una combinación de máquina de vapor y caldera sintetizando un conjunto de reglas de control obtenidas de operadores experimentados. El interés en el control difuso ha continuado desde entonces, y la literatura sobre el tema ha crecido rápidamente.

De acuerdo a lo que indica el autor Iancu, I. [9], un controlador lógico difuso consiste en un conjunto de reglas lógicas de la forma:

$$IF (condiciones) THEN (consecuencias inferidas) \quad (4)$$

Una regla de control difuso es una declaración condicional en la que el antecedente es una condición y el consecuente es una acción de control que debe aplicarse sobre el sistema que se desea controlar.

En algunas ocasiones varias variables lingüísticas están involucradas en los antecedentes y las conclusiones de una regla, en estos casos se denominan sistemas Fuzzy de entradas múltiples y salidas múltiples. En nuestro caso contamos con un sistema Fuzzy de dos entradas y una salida, el cual se fundamenta en un conjunto de reglas.

$$R_1: IF (x \text{ es } A_1) AND (y \text{ es } B_1) THEN (z \text{ es } C_1) \quad (5)$$

$$R_2: IF (x \text{ es } A_2) AND (y \text{ es } B_2) THEN (z \text{ es } C_2) \quad (6)$$

.....

$$R_n: IF (x \text{ es } A_n) AND (y \text{ es } B_n) THEN (z \text{ es } C_n) \quad (7)$$

Donde  $x$  y  $y$  son las variables de estado del proceso, mientras que  $z$  es la variable de control,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$  son valores de las variables lingüísticas

Las entradas de los sistemas basados en reglas difusas deben estar dadas por conjuntos difusos, por lo tanto, tenemos que fuzzificar las entradas. Además, la salida de un sistema difuso es siempre un conjunto difuso, por lo tanto, para obtener un valor específico en la salida tenemos que defuzzificarlo [9].

Los sistemas de control de lógica difusa constan de cuatro partes principales: interfaz de fuzzificación, base de reglas difusas, motor de inferencia difusa e interfaz de defuzzificación, como se presenta en la Figura 2.11

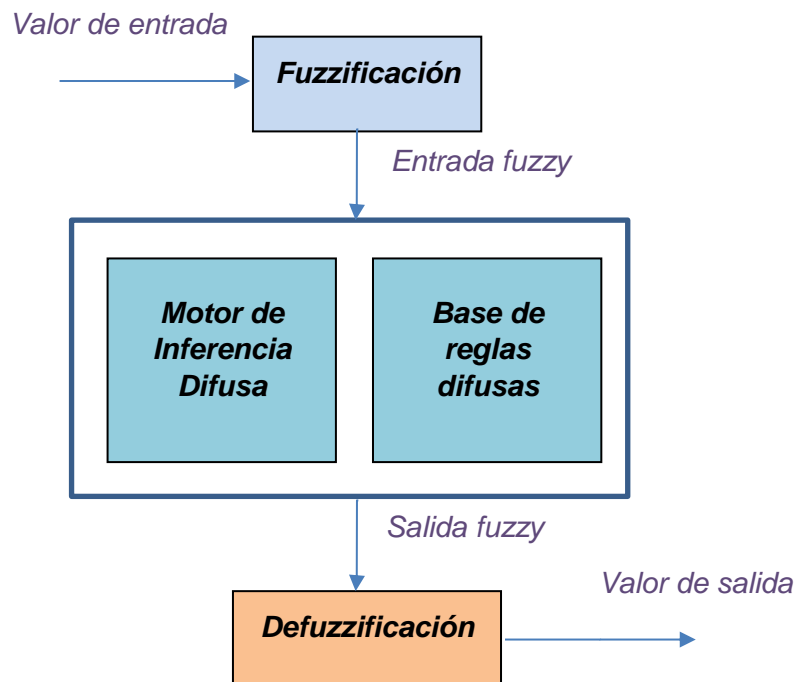


Figura 2.11. Estructura de controlador Fuzzy [8].

En la fuzzificación el valor de entrada se convierte en un rango difuso, luego el motor de inferencia determina el rango de salida de acuerdo a la base de reglas difusas y finalmente la defuzzificación nos permite cambiar el valor de salida difuso a un valor determinado puntual el cual sería la respuesta de este controlador.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE CONTROLADORES PID Y FUZZY-PID

#### 3.1. Diseño del controlador PID basado en modelo

Partiendo del modelo obtenido experimentalmente que representa el comportamiento del sistema que debemos controlar, hemos determinado su función de transferencia considerando las siguientes ecuaciones que representan su numerador y denominador respectivamente.

$$num = [0.3434] \quad (8)$$

$$den = [1 \ 0.6654 \ 0.6754] \quad (9)$$

Aplicando el comando *zpk* de Matlab obtenemos la función de transferencia representada en función de su ganancia, zeros y polos, la cual se muestra a continuación.

$$G_z = \frac{0.3434}{s^2 + 0.6654s + 0.6754} \quad (10)$$

La función de transferencia obtenida representa un sistema tipo SISO lo que quiere decir que esta conformado por una sola entrada y una sola salida, en este caso particular la entrada es una señal de voltaje tipo escalón unitario y la salida del sistema es la señal de voltaje obtenida a la salida del filtro pasa-bajos de segundo orden mostrado en la figura 2.7.

#### **Simulación del Modelo**

Una vez obtenida la función de transferencia procedimos a realizar la simulación de la planta utilizando la herramienta Matlab - Simulink®. En la figura 3.1 se muestra la representación del sistema utilizando su función de transferencia la cual recibe como entrada una señal tipo escalón unitario.



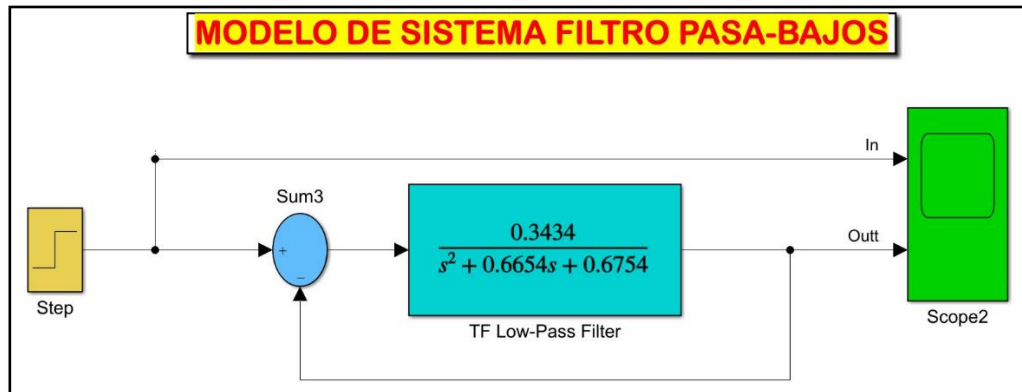


Figura 3.1. Simulación del sistema usando Matlab - Simulink®

La respuesta de esta simulación está mostrada en la figura 3.2 donde se observa la respuesta de lazo cerrado ante una entrada tipo escalón unitario.

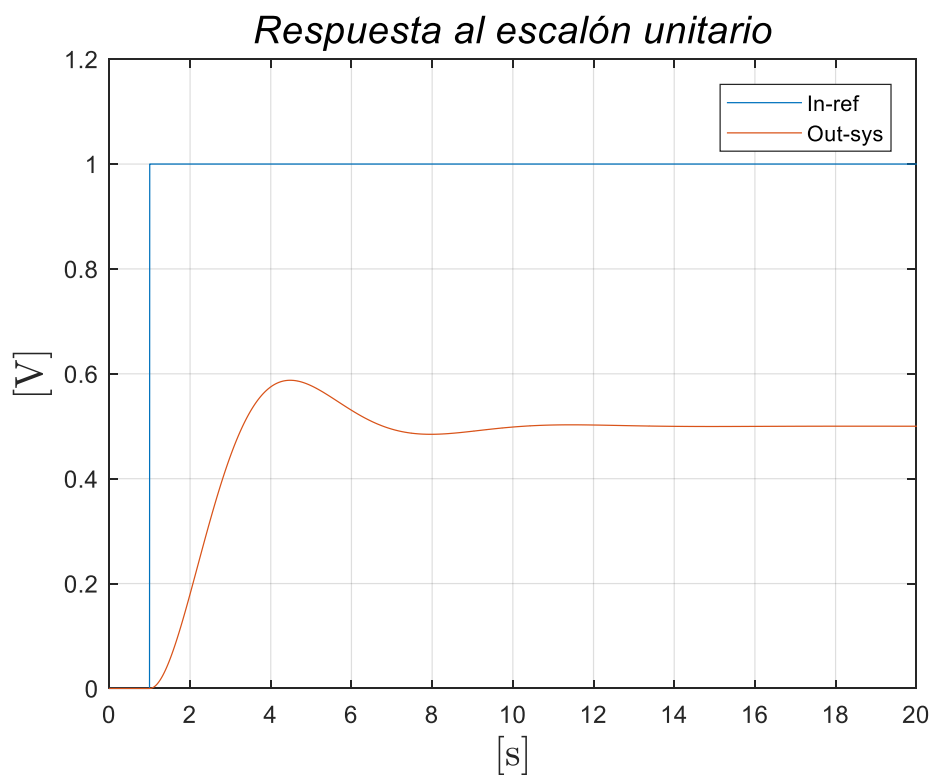


Figura 3.2. Respuesta del sistema ante escalón unitario.

Debido a que este es un sistema tipo SISO, hemos decidido utilizar el paquete de herramientas *sisotool* del software Matlab® para diseñar el controlador tipo PID.

Una vez iniciada la sesión en *sisotool*, hemos definido los requerimientos de diseño para el controlador PID que deseamos obtener, los cuales se muestran en la tabla 4.

Requerimientos de Diseño	Valor [Unidad]
Máximo Sobrenivel Porcentual	20 [%]
Tiempo de Estabilización $\leq$	5 [s]

Tabla 4: Requerimiento de diseño para controlador PID.

En la ventana del editor del localizador de raíces (Root Locus Editor) se colocan los requerimientos de diseño del controlador y al momento de implementarlos se muestran las áreas sombreadas como aparecen en la figura 3.3

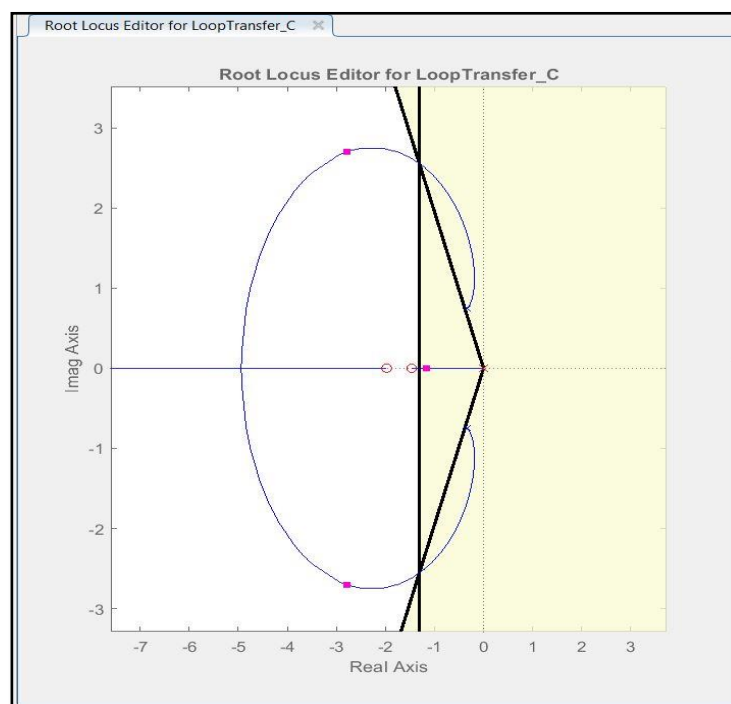


Figura 3.3. Requerimientos de diseño en sisotool.

Utilizamos entonces el método de localización de las raíces que básicamente consiste en determinar donde se encuentran los polos y ceros del sistema para poder modificarlos de tal manera que podamos cumplir los requerimientos de diseño propuestos. En este caso obtuvimos el controlador tipo PID, el cual lo hemos denominado como C1 y se muestra en la ecuación (11).

$$C1 = \frac{17.74(s + 1.46)(s + 1.97)}{s} \quad (11)$$

Una vez que obtenemos el controlador PID, debemos verificar en la ventana de la respuesta escalón (Step Response) que se cumplan los requerimientos de diseño. En la figura 3.4 se muestran las características resultantes de la respuesta escalón con el controlador PID que hemos obtenido.

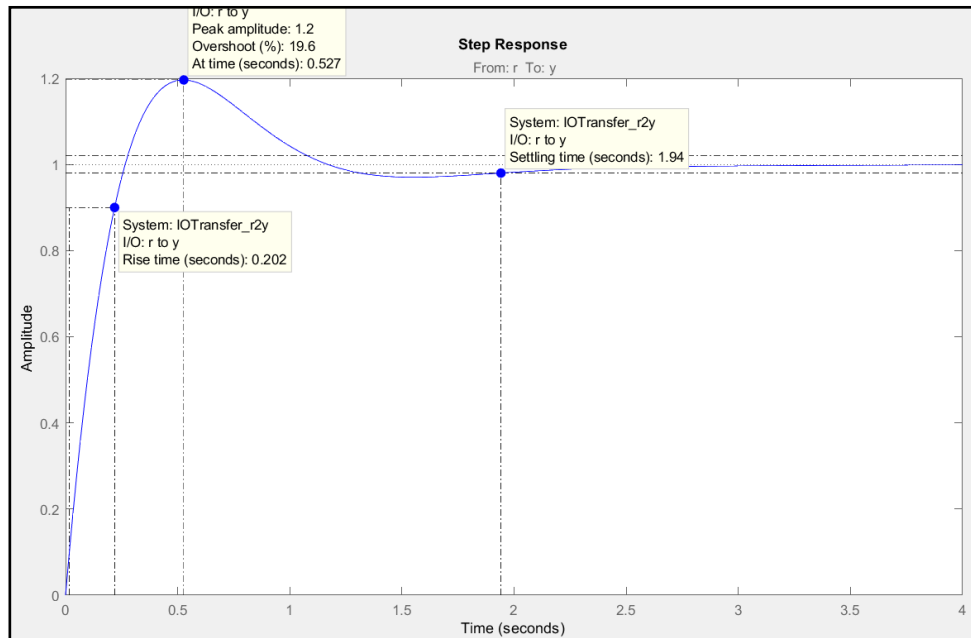


Figura 3.4. Características de la respuesta del controlador C1.

### 3.2. Diseño del controlador Fuzzy-PID

Una vez que hemos obtenido el modelo de la planta (filtro pasa-bajos de segundo orden) y el controlador C1 tipo PID, hemos seleccionado realizar el diseño de un controlador Fuzzy-PID con el objetivo de realizar el análisis comparativo entre los índices de desempeño de ambos controladores implementados en el modelo.

Hemos escogido el controlador Fuzzy tipo Mamdani, (el cual trabajará en conjunto con el PID) por ser un tipo de control inteligente que se fundamenta en el uso de variables lingüísticas y el desarrollo de las reglas lógicas que determinan su respuesta sobre el sistema aplicado.

Diseñamos las reglas del controlador difuso basados en la experiencia del funcionamiento del sistema para lo cual tomamos las siguientes consideraciones

- El punto de referencia es igual a cero.
- Se definen dos variables de entrada (error de posición y error de velocidad) y una salida (salida del controlador)

Se asignaron los siguientes valores lingüísticos para la variable error de posición

- **LE:** error de posición muy negativo.
- **NE:** error de posición negativo.
- **ZE:** error de posición cero
- **PE:** error de posición positivo.
- **HE:** error de posición muy positivo.

Se asignaron los siguientes valores lingüísticos para la variable error de velocidad

- **LV:** error de velocidad muy negativo.
- **NV:** error de velocidad negativo.
- **ZV:** error de velocidad cero
- **PV:** error de posición positivo.
- **HV:** error de velocidad muy positivo.

Se asignaron los siguientes valores lingüísticos para la variable error de salida

- **NO**: error de salida negativo.
- **ZO** error de salida cero
- **PO**: error de salida positivo.

Adicionalmente, se determina la relación entre cada uno de los estados de las entradas y su respectivo estado de salida, a este arreglo de estados se lo denomina reglas lógicas de control, las cuales se muestran en la tabla 5.

<b>V \ E</b>	<b>LE</b>	<b>NE</b>	<b>ZE</b>	<b>PE</b>	<b>HE</b>
<b>LV</b>	NO	NO	NO	PO	PO
<b>NV</b>	NO	NO	NO	PO	PO
<b>ZV</b>	NO	NO	ZO	PO	PO
<b>PV</b>	NO	NO	PO	PO	PO
<b>HV</b>	NO	NO	PO	PO	PO

Tabla 5: Reglas de lógica difusa para controlador Fuzzy

Esto quiere decir que; si:

1. El error de voltaje es muy negativo y el error de la velocidad es muy negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
2. El error de voltaje es muy negativo y el error de la velocidad es negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
3. El error de voltaje es muy negativo y el error de la velocidad es cero, entonces la salida del controlador es negativa.
4. El error de voltaje es muy negativo y el error de la velocidad es positivo, entonces la salida del controlador es negativa.

5. El error de voltaje es muy negativo y el error de la velocidad es muy positivo, entonces la salida del controlador es negativa.
6. El error de voltaje es negativo y el error de la velocidad es muy negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
7. El error de voltaje es negativo y el error de la velocidad es negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
8. El error de voltaje es negativo y el error de la velocidad es cero, entonces la salida del controlador es negativa.
9. El error de voltaje es negativo y el error de la velocidad es positivo, entonces la salida del controlador es negativa.
10. El error de voltaje es negativo y el error de la velocidad es muy positivo, entonces la salida del controlador es negativa.
11. El error de voltaje es cero y el error de la velocidad es muy negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
12. El error de voltaje es cero y el error de la velocidad es negativo, entonces la salida del controlador es negativa.
13. El error de voltaje es cero y el error de la velocidad es cero, entonces la salida del controlador es cero.
14. El error de voltaje es cero y el error de la velocidad es positivo, entonces la salida del controlador es positiva.
15. El error de voltaje es cero y el error de la velocidad es muy positivo, entonces la salida del controlador es positiva.
16. El error de voltaje es positivo y el error de la velocidad es muy negativo, entonces la salida del controlador es positiva.
17. El error de voltaje es positivo y el error de la velocidad es negativo, entonces la salida del controlador es positiva.
18. El error de voltaje es positivo y el error de la velocidad es cero, entonces la salida del controlador es positiva.

19. El error de voltaje es positivo y el error de la velocidad es positivo, entonces la salida del controlador es positiva.
20. El error de voltaje es positivo y el error de la velocidad es muy positivo, entonces la salida del controlador es positiva.
21. El error de voltaje es muy positivo y el error de la velocidad es muy negativo, entonces la salida del controlador es positiva.
22. El error de voltaje es muy positivo y el error de la velocidad es negativo, entonces la salida del controlador es positiva.
23. El error de voltaje es muy positivo y el error de la velocidad es cero, entonces la salida del controlador es positiva.
24. El error de voltaje es muy positivo y el error de la velocidad es positivo, entonces la salida del controlador es positiva.
25. El error de voltaje es muy positivo y el error de la velocidad es muy positivo, entonces la salida del controlador es positiva.

Una vez determinada estas reglas lógicas de control, procedimos a implementarlas en el Toolbox Fuzzy - Matlab®. A continuación, se muestra la aplicación del tipo de controlador las variables de entradas, salida y el tipo de controlador Fuzzy como se lo muestra en la figura 3.5.

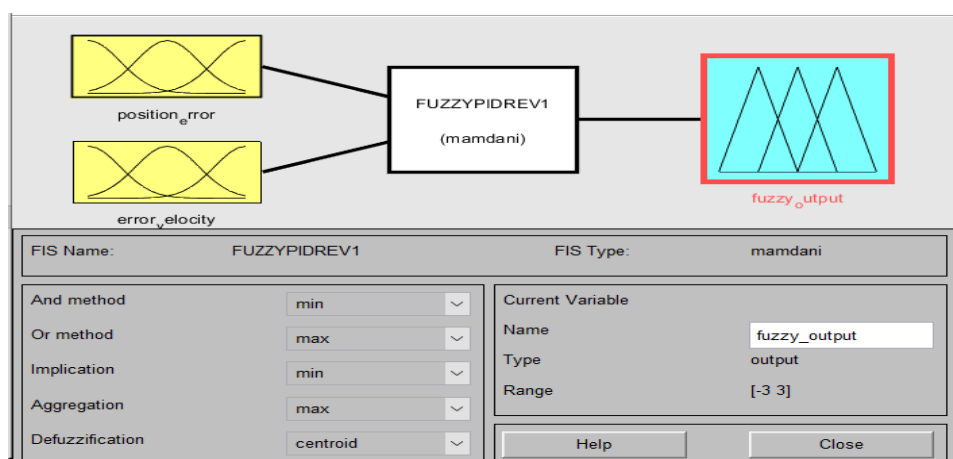


Figura 3.5. Diseñador de controlador Fuzzy.

### 3.3. Parametrización y ajuste del controlador FUZZY - PID

Para el desarrollo del controlador Fuzzy utilizamos la herramienta de Matlab - Fuzzy Logic Designer, para escoger el tipo de controlador, configurar sus variables lingüísticas, así como también implementar las reglas lógicas obtenidas en la sección anterior.

En la herramienta lo primero que debemos hacer es seleccionar el tipo de controlador Fuzzy que deseamos implementar como se ve en la figura 3.6.

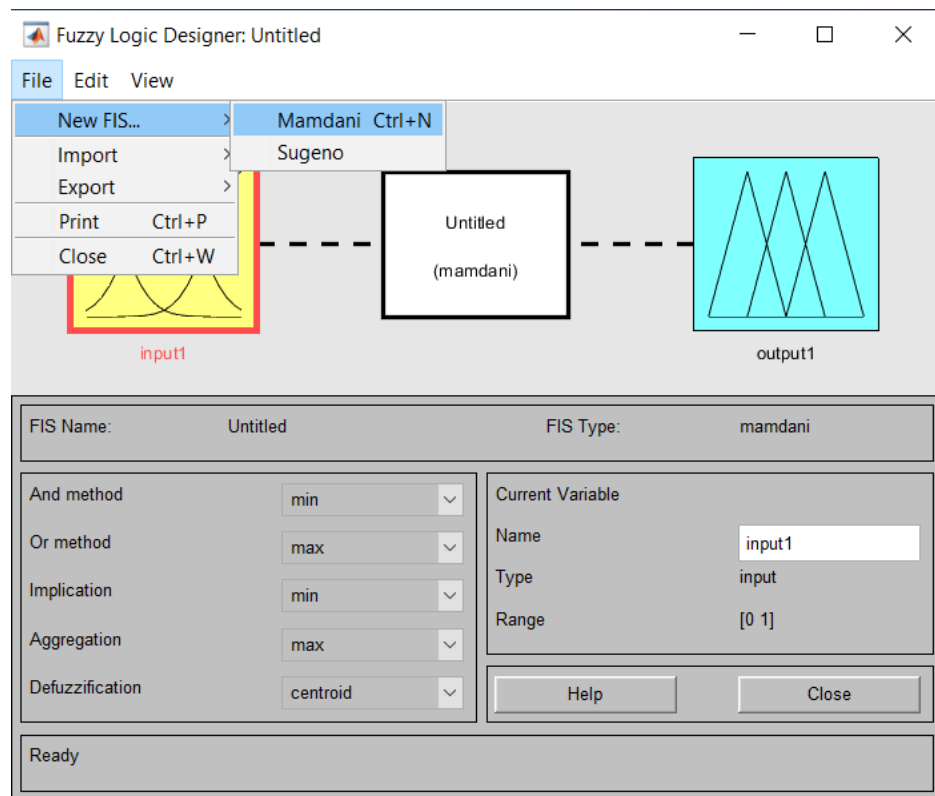


Figura 3.6. Selección del controlador Fuzzy tipo Mamdani.

Una vez seleccionado el tipo de controlador, debemos definir las variables de entrada, las variables de salida y las reglas lógicas para la operación del controlador difuso.



### Entrada error de posición

Para la primera entrada que es el error de posición se definen las características de su valor lingüístico error de posición muy negativo como lo muestra la tabla 6.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	LE
Tipo	Trimf
Parámetro	[-10 -6.5 -3]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 6: Características de error de posición muy negativo.

En la figura 3.7 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de posición muy negativo.

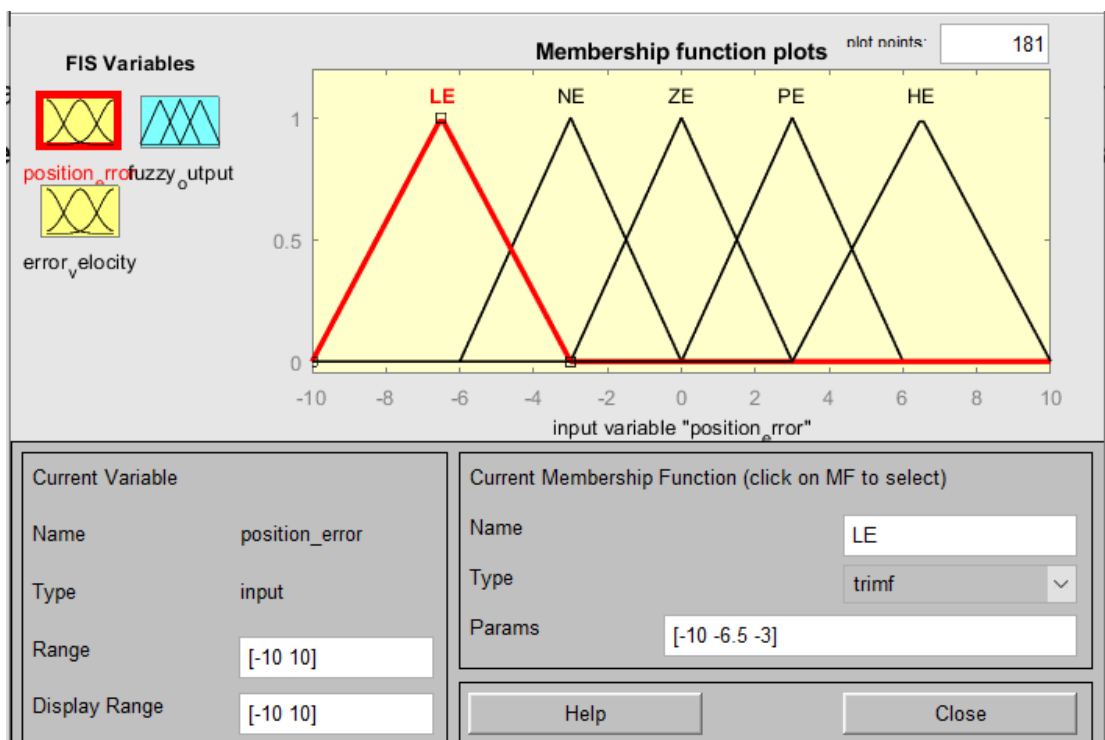


Figura 3.7. Implementación de entrada error de posición muy negativo.

Se definen las características del error de posición negativo como se ve en la tabla 7.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	NE
Tipo	Trimf
Parámetro	[-6 -3 0]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 7: Características de error de posición negativo.

En la figura 3.8 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de posición negativo.

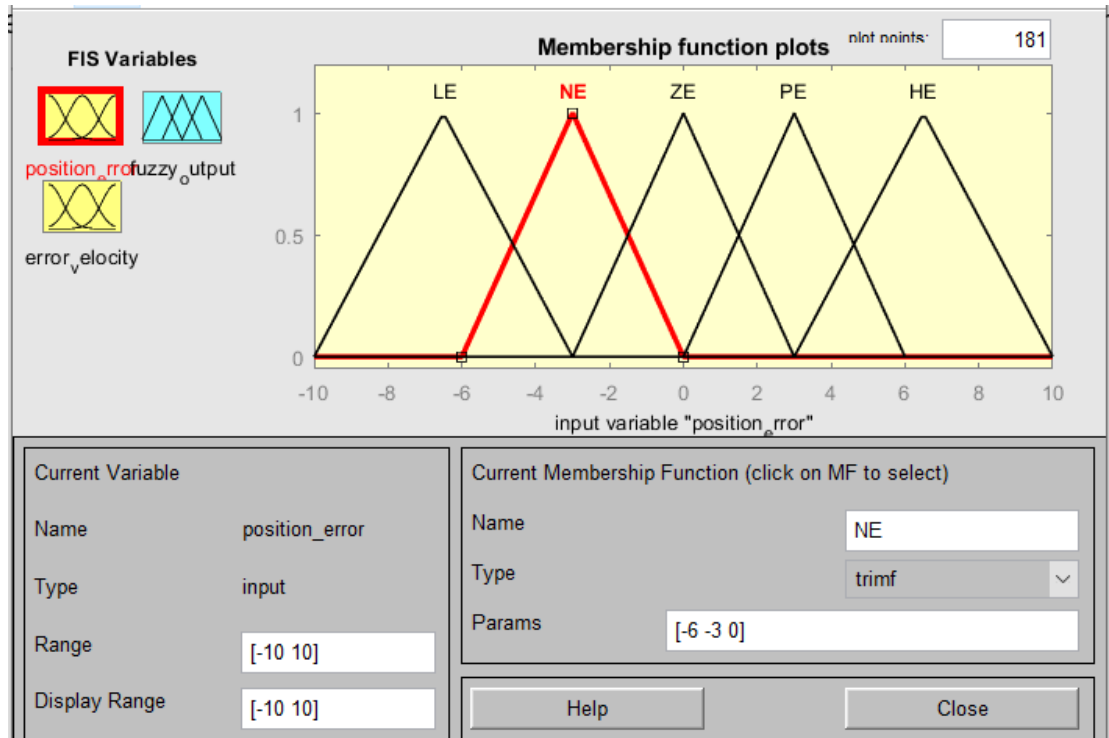


Figura 3.8. Implementación de entrada error de posición negativo.

Se definen las características del error de posición cero como se ve en la tabla 8.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	ZE
Tipo	Trimf
Parámetro	[-3 0 3]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 8: Características de error de posición cero.

En la figura 3.9 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de posición cero.

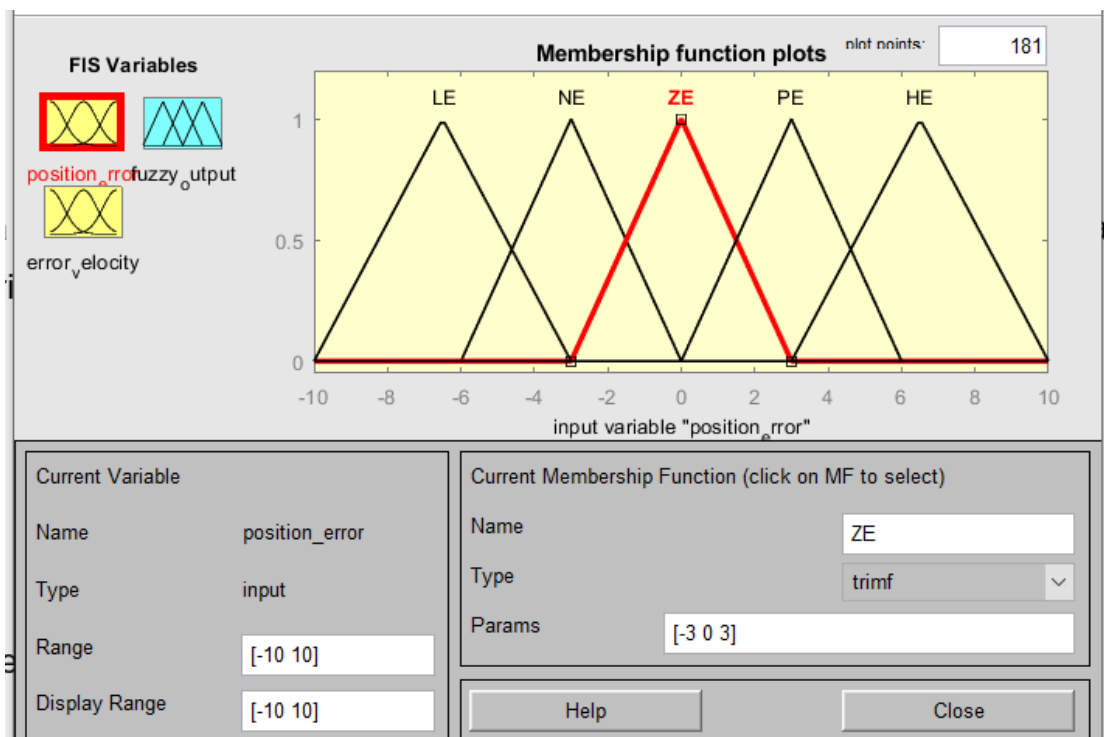


Figura 3.9. Implementación de entrada error de posición cero.

Se definen las características del error de posición positivo en la tabla 9.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	PE
Tipo	Trimf
Parámetro	[0 3 6]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 9: Características de error de posición positivo.

En la figura 3.10 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de posición positivo.

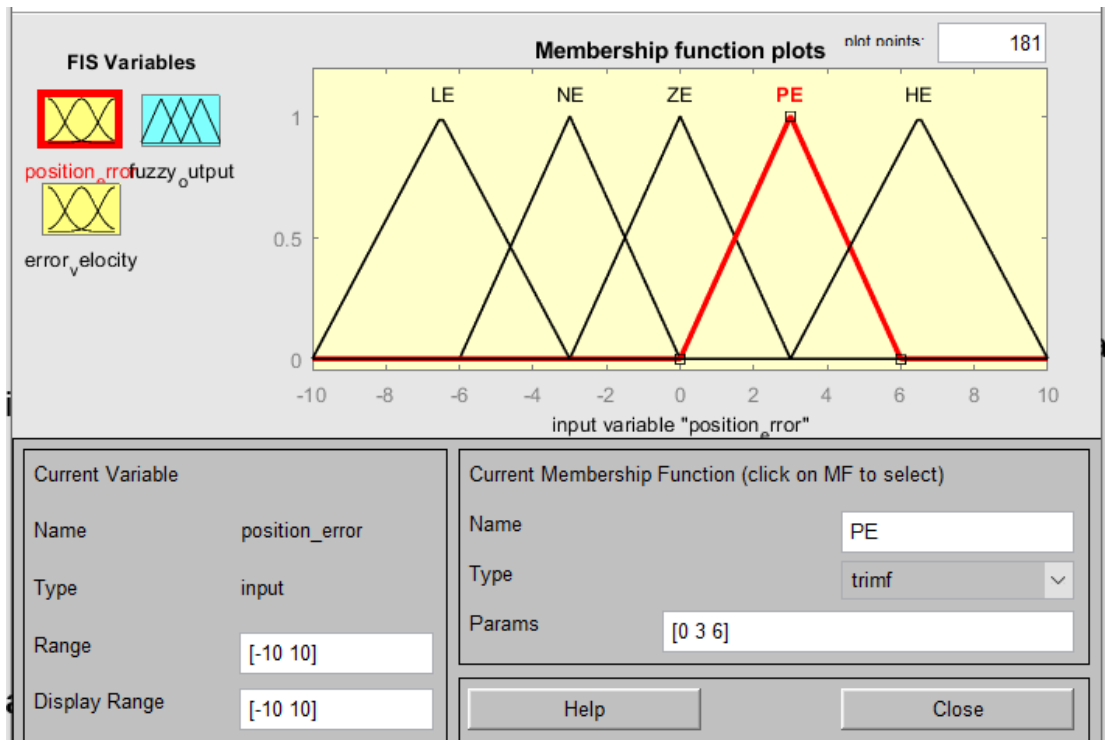


Figura 3.10. Implementación de entrada error de posición positivo.

Se definen las características del error de posición muy positivo en la tabla 10.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	HE
Tipo	Trimf
Parámetro	[3 6.5 10]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 10: Características de error de posición muy positivo.

En la figura 3.11 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de posición muy positivo.

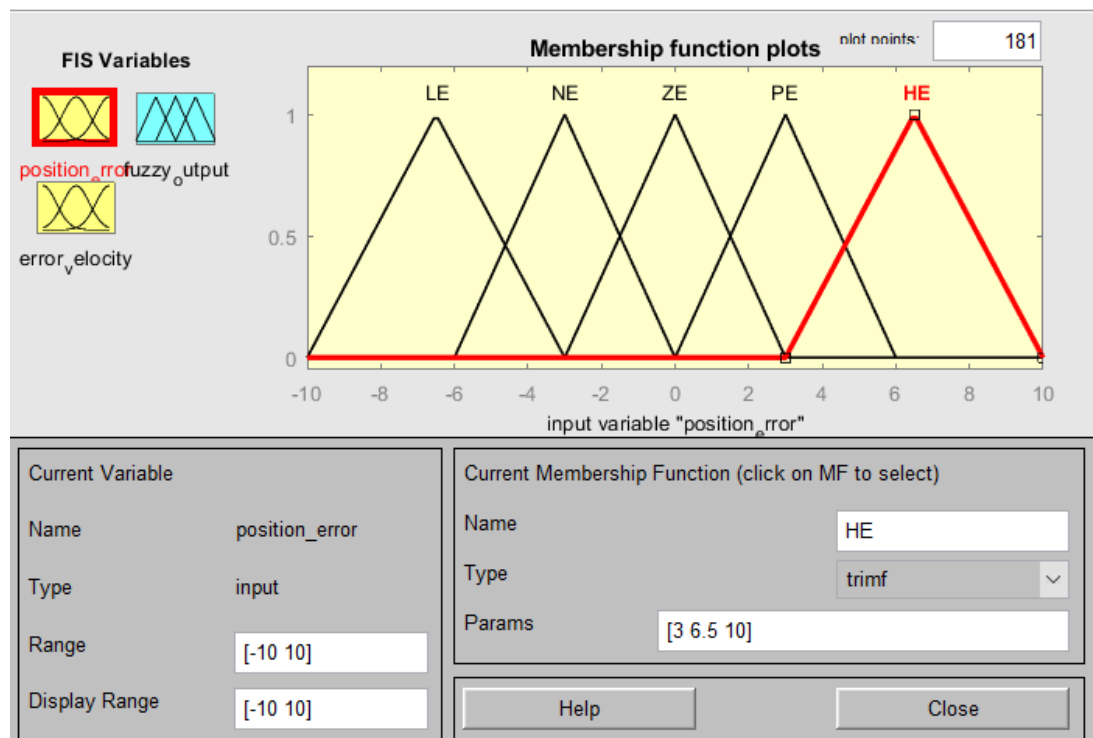


Figura 3.11. Implementación de entrada error de posición muy positivo.

### Entrada error de velocidad

Para la segunda entrada que es el error de velocidad se definen las características de su valor lingüístico error de velocidad muy negativo como muestra la tabla 11.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	LV
Tipo	Trimf
Parámetro	[-10 -6.5 -3]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 11: Características de error de velocidad muy negativo.

En la figura 3.12 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de velocidad muy negativo.

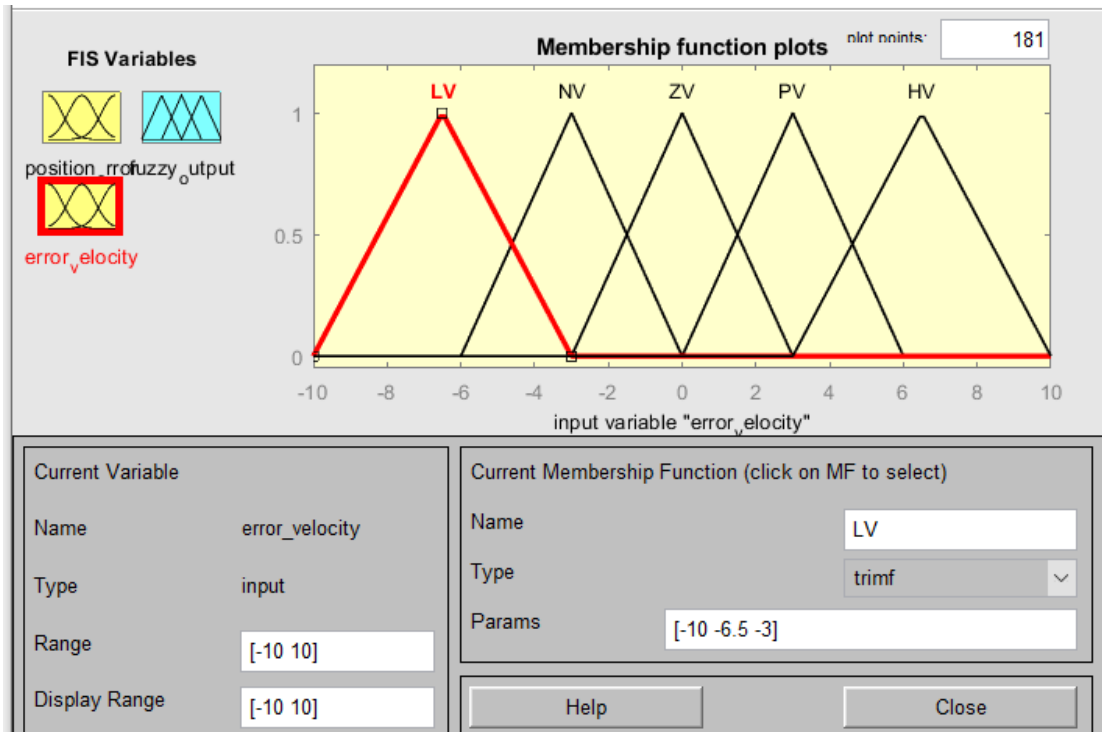


Figura 3.12. Implementación de entrada error de velocidad muy negativo.

Se definen las características del error de velocidad negativo en la tabla 12.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	NV
Tipo	Trimf
Parámetro	[-6 -3 0]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 12: Características de error de velocidad negativo.

En la figura 3.13 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de velocidad negativo.

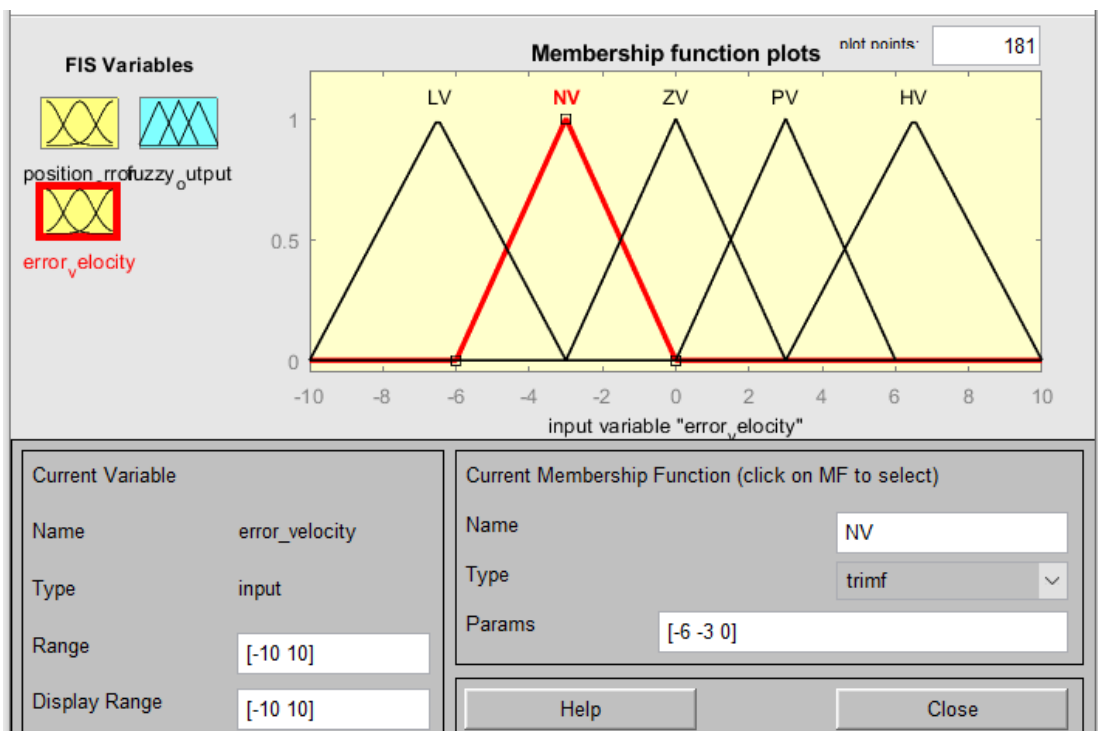


Figura 3.13. Implementación de entrada error de velocidad negativo.

Se definen las características del error de velocidad cero en la tabla 13.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	ZV
Tipo	Trimf
Parámetro	[-3 0 3]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 13: Características de error de velocidad cero.

En la figura 3.14 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de velocidad cero.

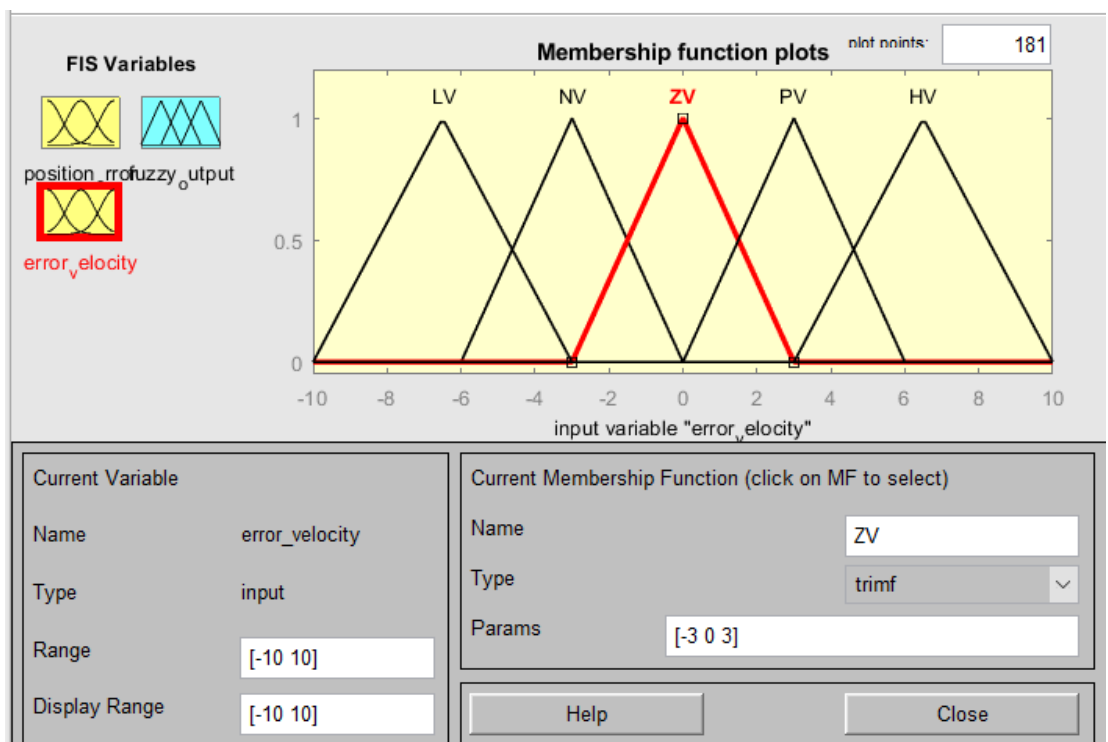


Figura 3.14. Implementación de entrada error de velocidad cero.



Se definen las características del error de velocidad positivo en la tabla 14.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	PV
Tipo	Trimf
Parámetro	[0 3 6]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 14: Características de error de velocidad positivo.

En la figura 3.15 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de velocidad positivo

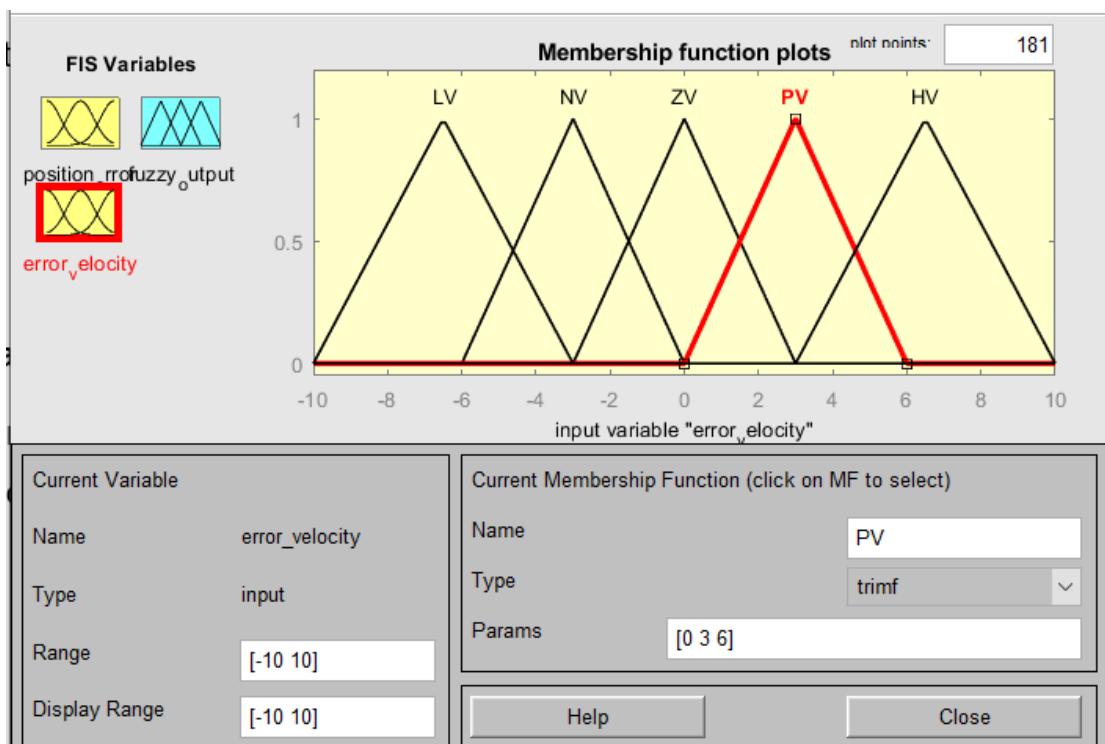


Figura 3.15. Implementación de entrada error de velocidad positivo.

Se definen las características del error de velocidad muy positivo en la tabla 15.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	HV
Tipo	Trimf
Parámetro	[3 6.5 10]
Rango	[-10 10]
Rango de display	[-10 10]

Tabla 15: Características de error de velocidad muy positivo.

En la figura 3.16 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para el error de velocidad muy positivo

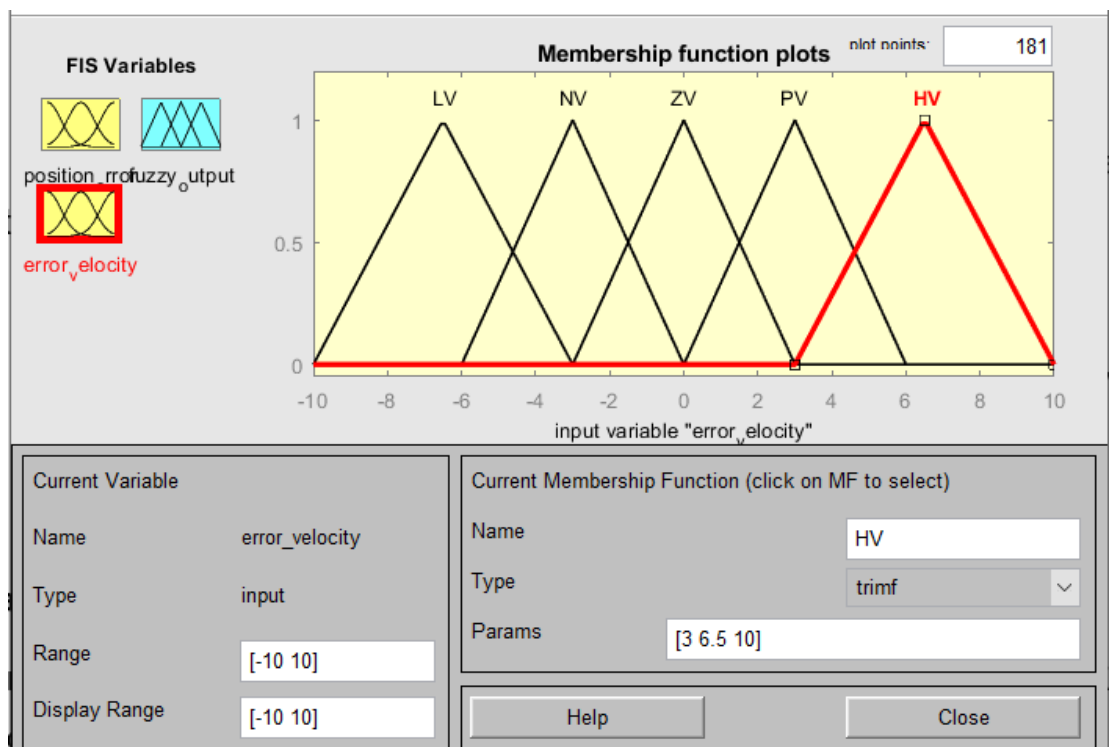


Figura 3.16. Implementación de entrada error de velocidad muy positivo.

### Salida de voltaje

Para la salida que es el voltaje se definen las características de su valor lingüístico error de salida de voltaje negativo como lo muestra la tabla 16.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	NO
Tipo	Zmf
Parámetro	[-0.45 -0.05]
Rango	[-3 3]
Rango de display	[-3 3]

Tabla 16: Características de salida de voltaje negativo.

En la figura 3.17 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para la salida de voltaje negativo.

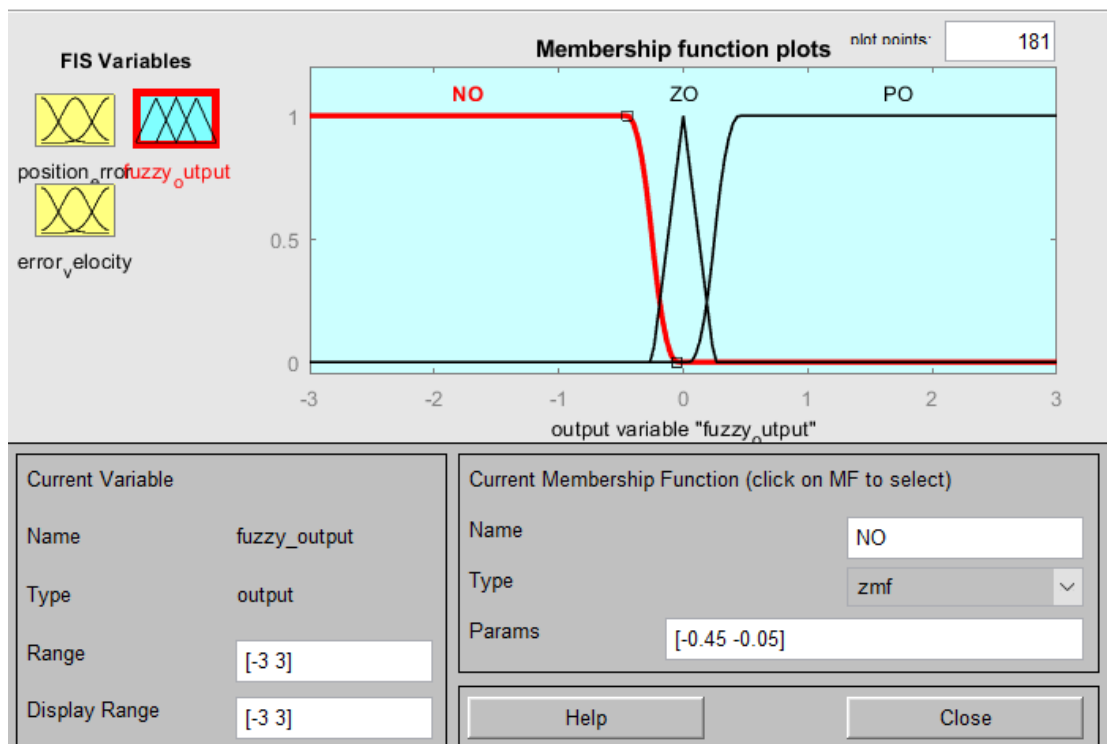


Figura 3.17. Implementación de salida de voltaje negativo.

Se definen las características de salida de voltaje cero en la tabla 17.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	ZO
Tipo	Trimf
Parámetro	[-0.25 0 0.25]
Rango	[-3 3]
Rango de display	[-3 3]

Tabla 17: Características de salida de voltaje cero.

En la figura 3.18 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para la salida de voltaje cero.

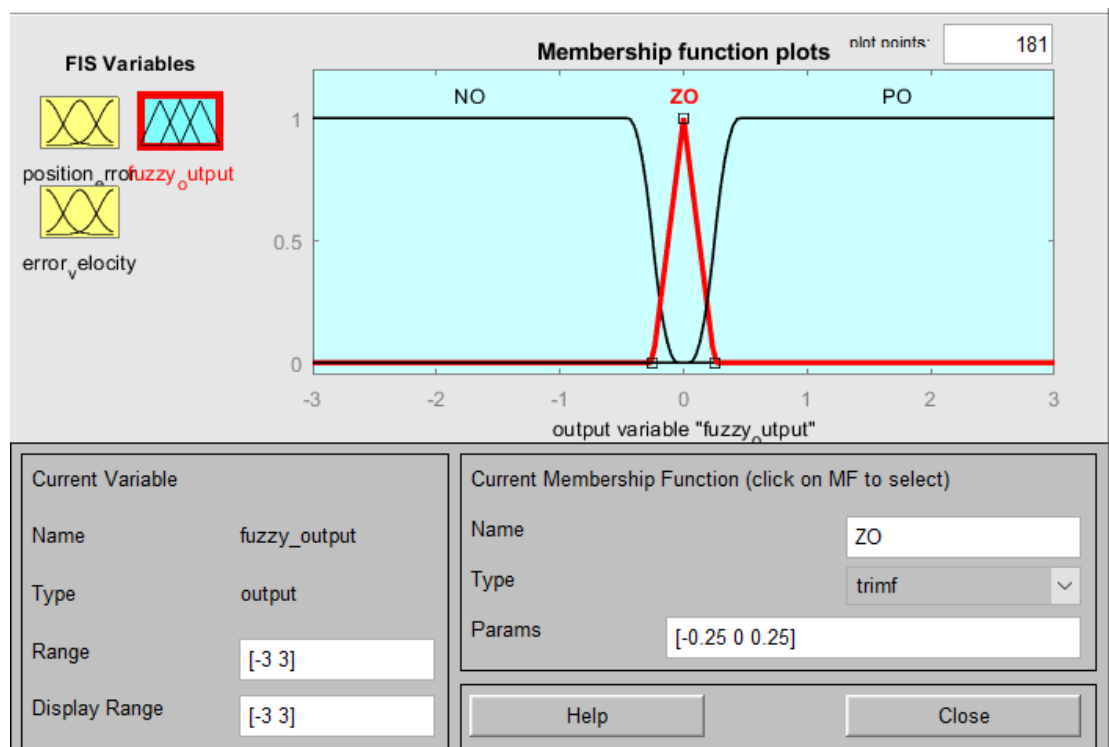


Figura 3.18. Implementación de salida de voltaje cero.

Se definen las características de salida de voltaje positivo en la tabla 18.

Valor Lingüístico	Valor
Nombre	PO
Tipo	Smf
Parámetro	[0.05 0.45]
Rango	[-3 3]
Rango de display	[-3 3]

Tabla 18: Características de salida de voltaje positivo.

En la figura 3.19 se muestra la aplicación de los valores determinados en la tabla anterior para la salida de voltaje positivo.

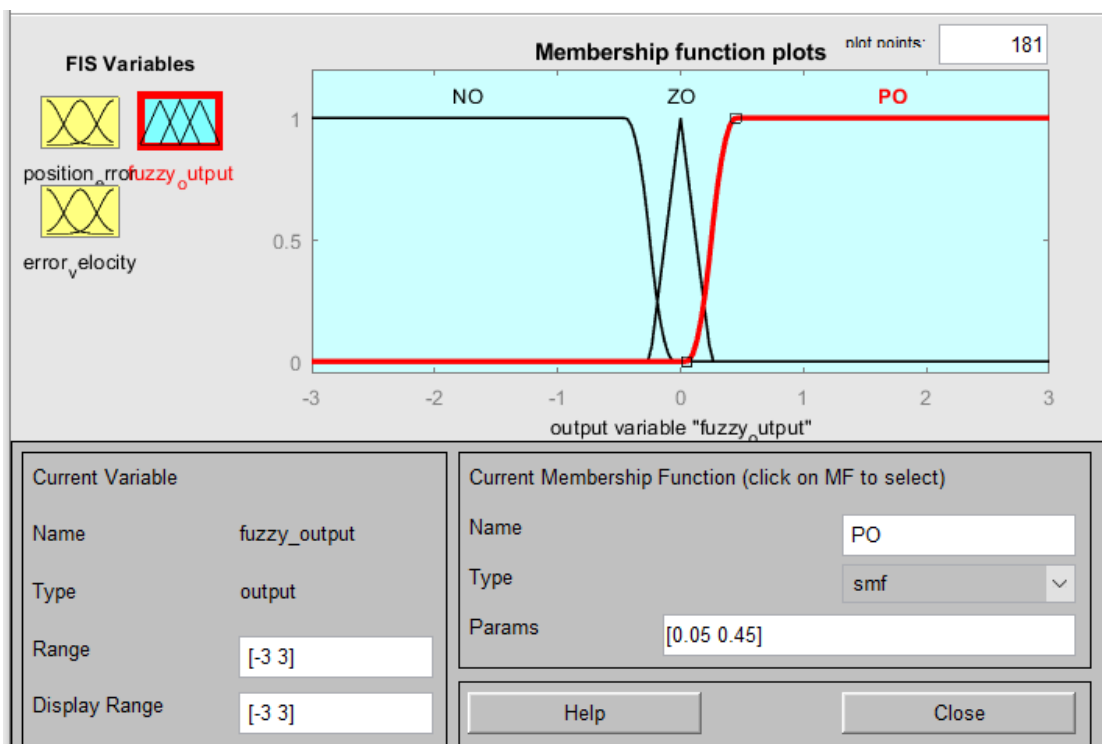


Figura 3.19. Implementación de salida de voltaje positivo.

### Reglas lógicas del controlador Fuzzy

Una vez que hemos implementado las entradas y salida en la herramienta de diseño, se procede a insertar todas las reglas lógicas que gobernarán el comportamiento del controlador, modificando el estado de su salida de acuerdo al estado de sus entradas.

En la figura 3.20 se muestran las reglas lógicas implementadas y que fueron determinadas en la sección 3.2

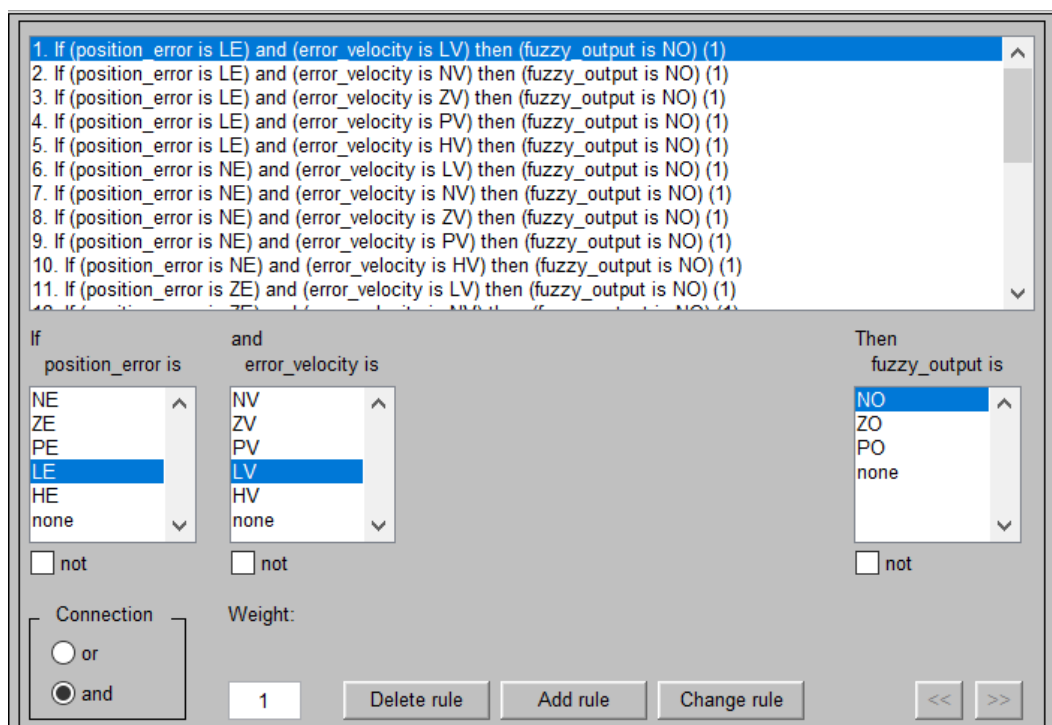


Figura 3.20 Implementación de reglas lógicas del controlador Fuzzy.

Además de colocar las reglas debemos realizar la validación de la aplicación de las mismas utilizando la herramienta Rule Viewer del Fuzzy Logic Designer.

En la figura 3.21 se muestra la validación del controlador, cuando el error de posición es muy positivo y el error de velocidad es muy positivo, entonces la salida de voltaje del controlador debe ser positiva.

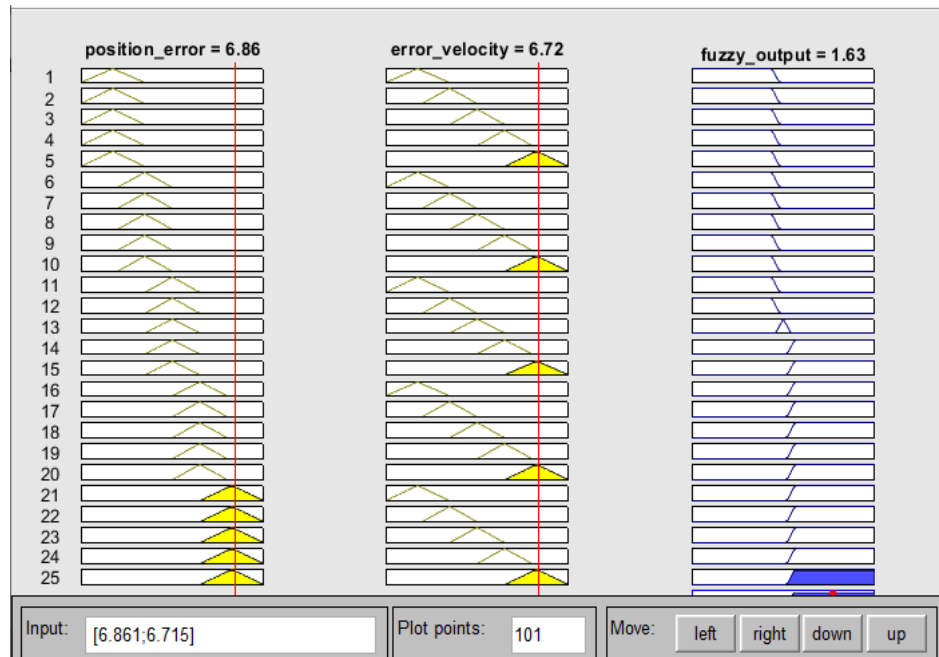


Figura 3.21. Validación de aplicación de reglas del controlador Fuzzy".

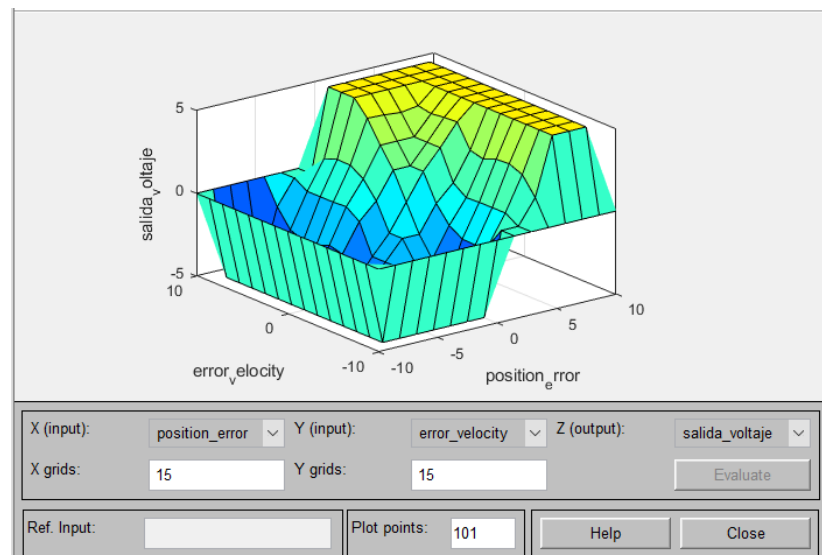


Figura 3.22. Superficie de control para controlador Fuzzy".

La superficie de control se muestra en la figura 3.22 y representa gráficamente la salida del controlador ante los diferentes valores de sus entradas.

## CAPÍTULO 4

### SIMULACION Y COMPARACION DE LOS CONTROLADORES

#### 4.1 Aplicación de controlador PID a modelo de filtro pasa-bajos

Una vez que hemos obtenido el controlador PID el cual se ha denominado como C1, obtuvimos sus variables características  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  por medio de los siguientes comandos de Matlab®.

$$k_p = pid(C1).k_p = 61.0487 \quad (12)$$

$$k_i = pid(C1).k_i = 51.3637 \quad (13)$$

$$k_d = pid(C1).k_d = 17.7425 \quad (14)$$

Con estos parámetros procedimos a modelar la implementación del controlador PID sobre el filtro pasa-bajos de segundo orden para determinar la respuesta controlada del sistema ante una entrada tipo escalón unitario. En la figura siguiente se muestra la implementación del controlador sobre el modelo experimentalmente obtenido.

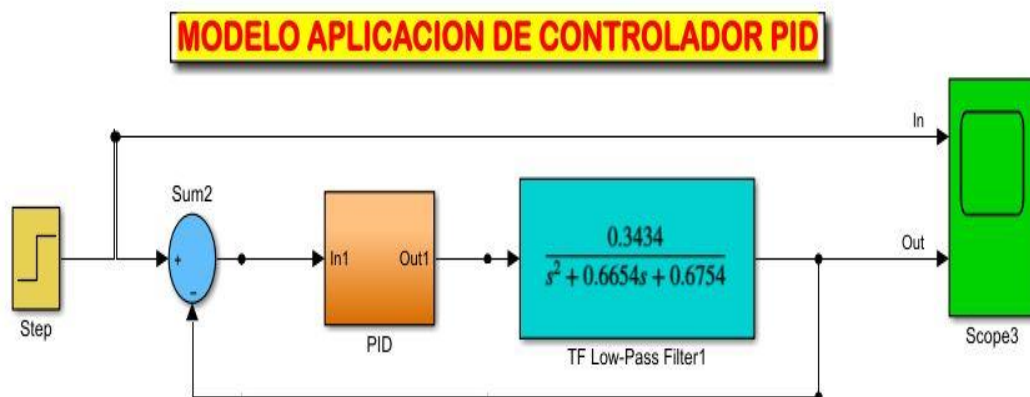


Figura 4.1. Modelo de implementación del controlador PID.



Luego de la simulación, se observa gráficamente la respuesta del sistema ante la aplicación de una entrada escalón unitario, la cual se muestra en la figura 4.2.

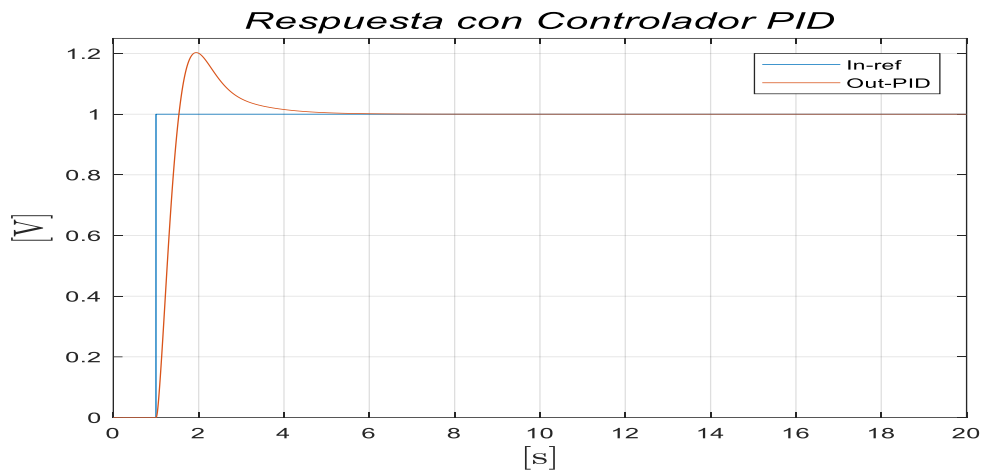


Figura 4.2. Respuesta del sistema con controlador PID.

Es importante también además de ver la respuesta del sistema poder visualizar el comportamiento del error, el cual en estado estable debe ser igual a cero, y salida del controlador PID la cual también debe ser igual a cero. Ambas curvas se registran en la figura 4.3

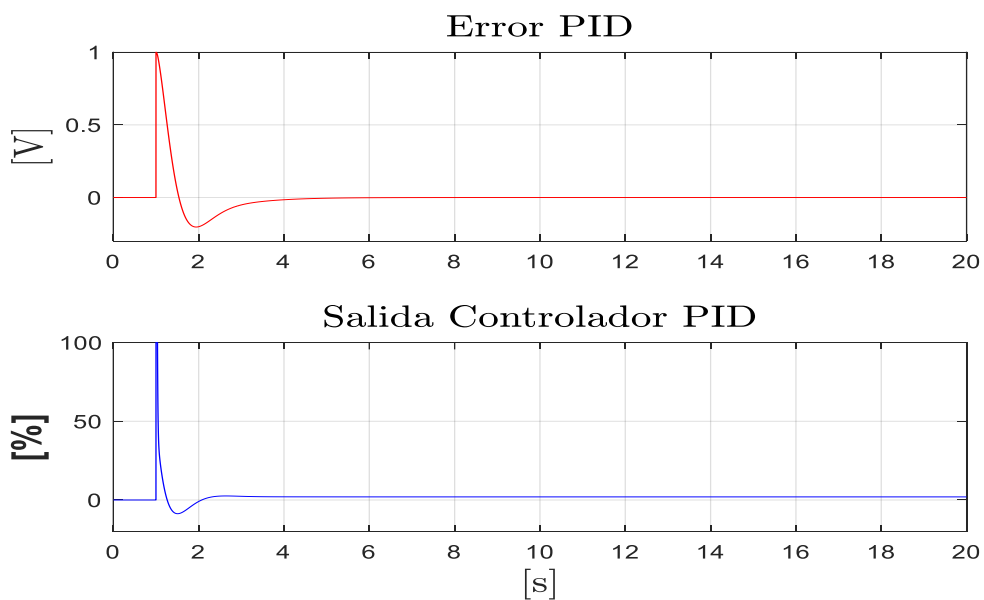


Figura 4.3. Señal de error y salida del controlador de voltaje PID.

## 4.2 Aplicación de controlador Fuzzy-PID a modelo de filtro pasa-bajos

Una vez que hemos obtenido el controlador Fuzzy en la sección 3.3 procedemos a implementarlo junto con el controlador PID para formar el controlador inteligente Fuzzy-PID el cual se implementó en el software Simulink-Matlab® como se muestra en la figura 4.4

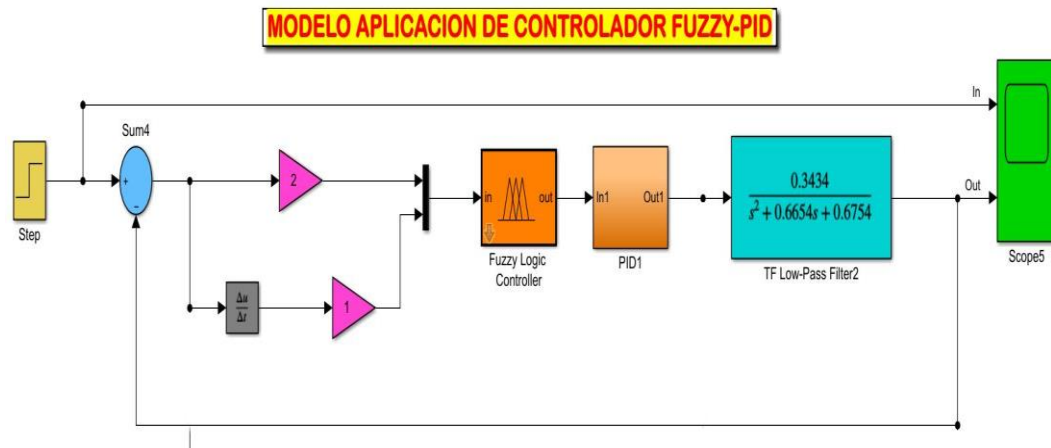


Figura 4.4. Modelo de implementación del controlador Fuzzy-PID.

Luego de la simulación, se observa gráficamente la respuesta del sistema ante la aplicación de una entrada escalón unitario, la cual se muestra en la figura 4.5.

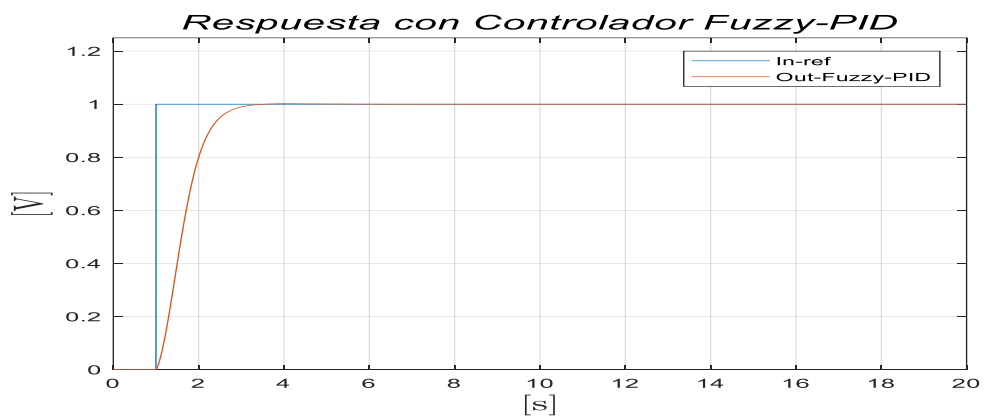


Figura 4.5. Respuesta del sistema con controlador Fuzzy-PID.

Observamos que el cambio de referencia ocurre en  $t=1s$ , produciendo una respuesta sobreamortiguada y un tiempo de estabilización menor a 4 segundos.

Hemos obtenido las gráficas de la señal del error y la salida del controlador Fuzzy-PID las cuales se muestran en la figura 4.6.

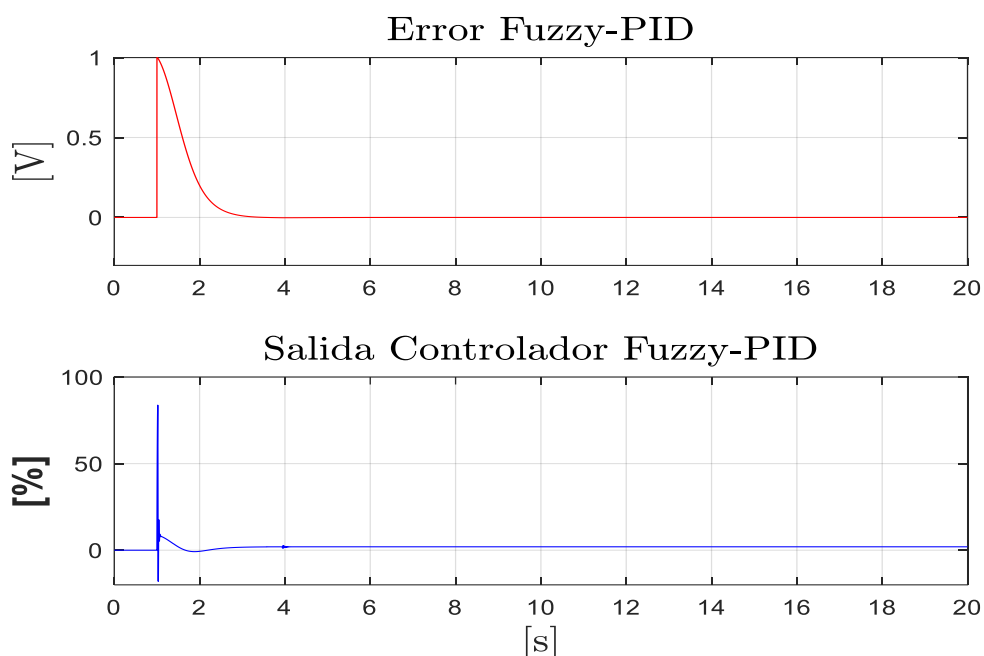


Figura 4.6. Señal de error y salida del controlador Fuzzy-PID.

La salida del controlador Fuzzy-PID alcanza su pico máximo en el momento que se produce el cambio de referencia y empieza a estabilizarse en corto tiempo, mientras se observa una pronta reducción de la señal del error que alcanza el valor de cero.

#### 4.3 Análisis comparativo entre controladores PID y Fuzzy-PID.

Para poder realizar nuestro análisis comparativo, hemos considerado las gráficas de respuesta de los controladores PID y Fuzzy-PID para determinar los valores aproximados de sus índices de desempeño y así poder determinar cuál es el controlador que más se aproxima a la respuesta ideal ante una entrada de tipo escalón unitario.

En este análisis vamos a utilizar los siguientes índices de desempeño: Tiempo de Levantamiento (s), Sobrenivel Porcentual (%), Tiempo de Estabilización (s), Respuesta del controlador (%) y métricas relacionadas al comportamiento del error.

La respuesta del sistema, que para nuestro caso es un filtro pasa-bajos, cuando se aplica el controlador de tipo PID clásico se puede observar en la figura 4.7 la cual es de tipo subamortiguada y sin retraso.

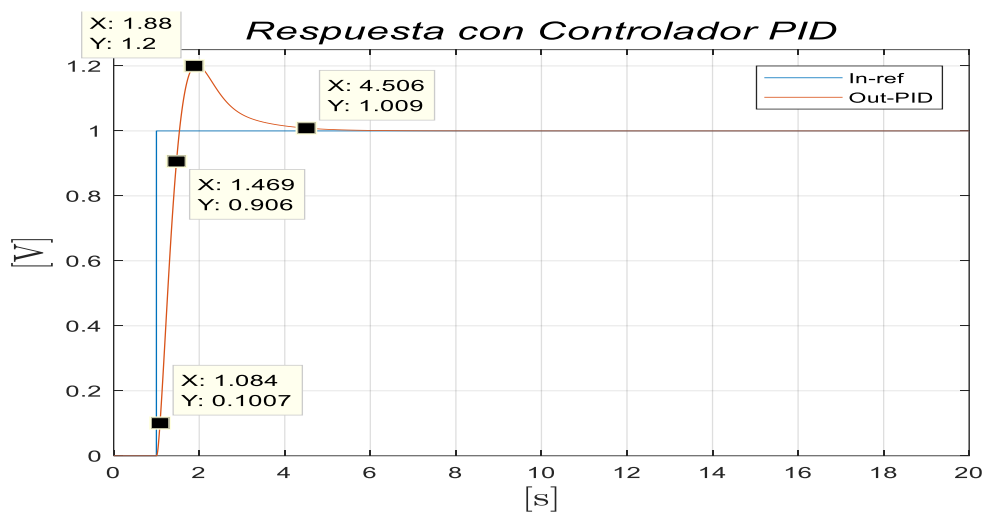


Figura 4.7. Respuesta del sistema con controlador PID.

Con la implementación del controlador tipo PID, determinamos los índices de desempeño, los cuales se muestran en la tabla 19.

Índices de desempeño	Requerido	Obtenido
Tiempo de Levantamiento	2 [s]	0.39 [s]
Máximo Sobrenivel Porcentual	20 [%]	20 [%]
Tiempo de Estabilización	$\leq 3$ [s]	4.50 [s]

Tabla 19: Índices de desempeño para controlador PID.

En otro escenario, analizamos la respuesta del sistema cuando se aplica el controlador de tipo Fuzzy- PID se puede observar en la figura 4.8 la cual es de tipo sobreamortiguada y sin retraso.

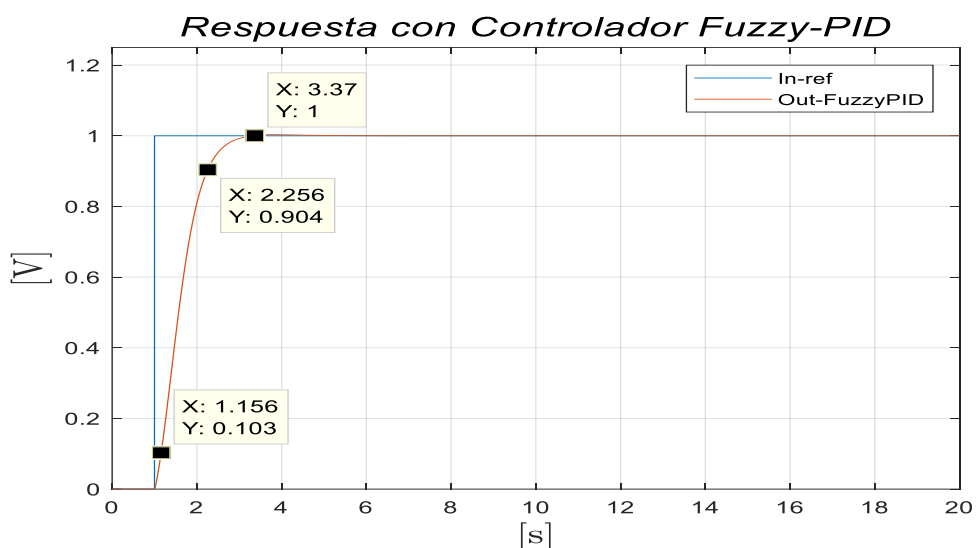


Figura 4.8. Respuesta del sistema con controlador Fuzzy-PID.

Con la implementación del controlador tipo Fuzzy-PID, determinamos los índices de desempeño, los cuales se muestran en la tabla 16.

Índices de desempeño	Requerido	Obtenido
Tiempo de Levantamiento	2 [s]	1.10 [s]
Máximo Sobrenivel Porcentual	20 [%]	0 [%]
Tiempo de Estabilización	$\leq 5$ [s]	3.37 [s]

Tabla 20: Índices de desempeño para controlador Fuzzy-PID.

A continuación, se presentan los índices de desempeño para el controlador PID y para el controlador Fuzzy-PID, estos indicadores se muestran en la tabla 21.

Índice de Desempeño	Controlador PID	Controlador Fuzzy-PID
Tiempo de Levantamiento	0.39 [s]	1.10 [s]
Sobrenivel Porcentual	20 [%]	0 [%]
Tiempo de Estabilización	4.50 [s]	3.37 [s]
Desviación Estándar	0.2502	0.2728
RMSE	0.9491	0.8851

Tabla 21: Índices de Desempeño de Controladores PID y Fuzzy-PID.

### Respuesta ante perturbaciones.

En esta sección utilizamos la función “band-limited white noise” de Simulink® el cual representa una perturbación externa al sistema, esto con el propósito de determinar la respuesta de los controladores PID y Fuzzy-PID ante una perturbación aleatoria que representa el ruido externo al sistema.

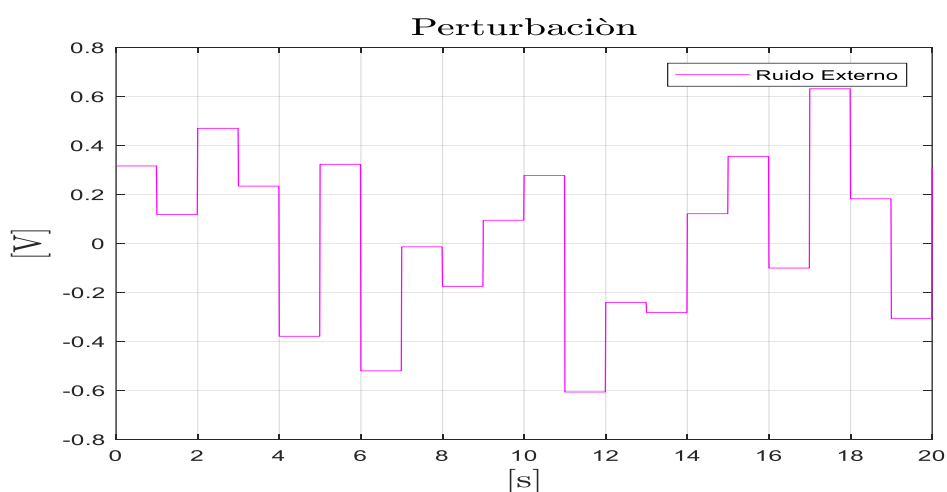


Figura 4.9. Perturbación externa al sistema.

Se obtienen entonces las curvas para la señal de referencia, la respuesta del sistema con el controlador PID, y con el controlador Fuzzy-PID en la figura 4.10 y también es importante revisar el comportamiento de la salida de los controladores PID y Fuzzy-PID que se visualizan en la figura 4.11.

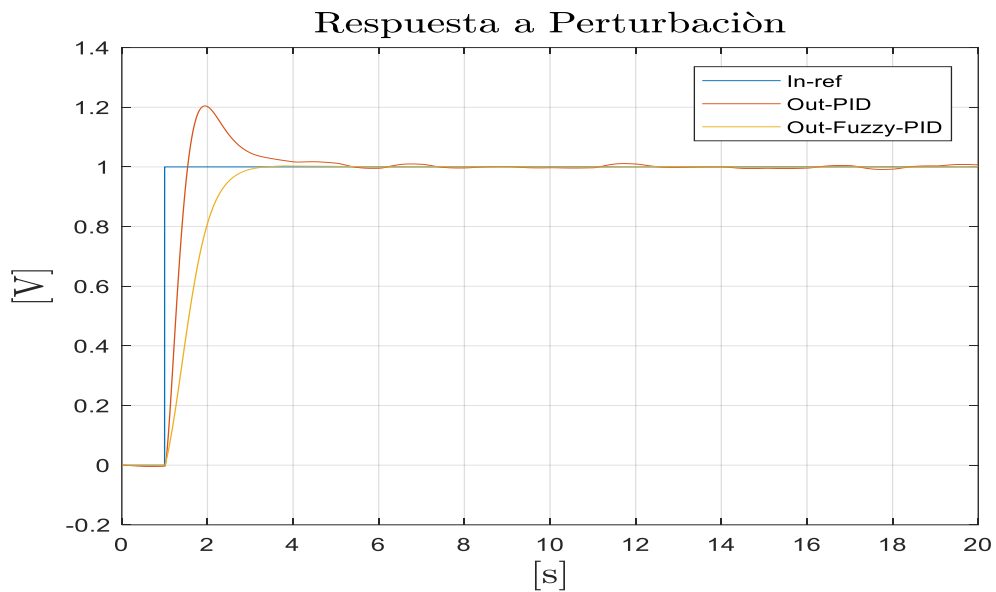


Figura 4.10. Respuesta de los controladores ante una perturbación.

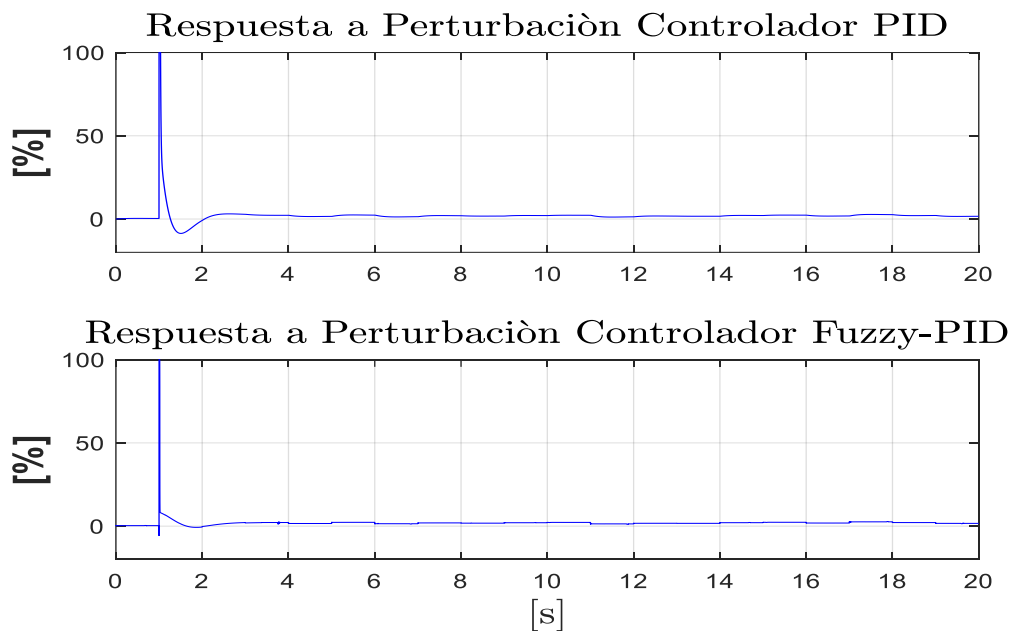


Figura 4.11. Señales de controladores frente a la perturbación.

## CONCLUSIONES

- 1.- Para obtener un modelo que represente fielmente el comportamiento de un sistema físico se utilizaron las herramientas que aprendimos en el módulo Identificación de Sistemas y fundamentalmente parametrizar de manera correcta los parámetros que intervienen en la captura de datos de la señal muestreada.
- 2.- La función de transferencia que representa al modelo del filtro pasa-bajos de segundo orden demostró que este es un sistema tipo SISO (single input, single output) y utilizando las técnicas que aprendimos en el módulo Sistemas de Control de Tiempo Continuo pudimos obtener el controlador clásico tipo PID.
- 3.- De acuerdo a los índices de desempeño del controlador PID diseñado, se observó que se logró cumplir los requerimientos de diseño y se obtuvo una buena respuesta ante las perturbaciones externas.
- 4.- Conociendo el principio de funcionamiento del proceso, pudimos diseñar un controlador inteligente Fuzzy-PID tipo Mamdani ya que es muy intuitivo de configurar pues está basado en el uso de las variables lingüísticas y reglas lógicas de control lo cual aprendimos en el módulo de Control Inteligente.
- 5.- Los datos presentados en la tabla 17 nos permitió concluir que el controlador de voltaje tipo Fuzzy-PID muestra mejor rendimiento con respecto al controlador de voltaje tipo PID, ya que tiene un menor tiempo de estabilización, una mayor precisión en estado estable y una mejor respuesta ante las perturbaciones externas.



## RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- 1.- Se recomienda conocer el principio de funcionamiento del sistema para lograr anticipar las respuestas esperadas ante el accionamiento de cualquier controlador que se requiera implementar.
- 2.- Recomendamos para un posterior trabajo la realización de un controlador predictivo basado en este modelo para regular la amplitud del voltaje de salida del filtro pasa-bajos.
- 3.- Sugerimos implementar los controladores obtenidos en nuestro trabajo sobre un filtro pasa-bajos real sería un nuevo desafío para contrastar las respuestas reales del sistema con respecto a las respuestas simuladas que presentamos en este documento.
- 4.- Se recomienda realizar una comparación entre la respuesta de un controlador Fuzzy tipo Mamdani y la respuesta de un controlador Fuzzy tipo Sugeno, hicieron para el sistema del filtro pasa-bajos como un aporte al presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cabrera Peña, José. "Filtros Activos, Teoría" 2009 Disponible en web <http://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>
- [2] Tamayo, Juan. (2016). "Diseño e implementación de controladores digitales a través de un sistema de adquisición de datos," 2016 Scientia et técnica. Vol 21, Pages 204, ISSN 0122-1701
- [3] S. S. Patil, G. M. Malwatkar and J. V. Kulkarni, "Performance enhancement in disturbance rejection by PID controller in series with low pass filter," 2012 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCIC.2012.6510263.
- [4] [Ulises Martínez Hernández, Bryan Andrés Marcelo, Benigno Muñoz Barrón, José Miguel Hernández Paredes, "Control PID Convencional con Filtro Pasa Bajas para el Control de Velocidad de un Motor de CD", REIA (2019), Vol 5, Pages 16-19, ISSN: 2448-6817
- [5] Coughlin, R., Driscoll, F. and Alatorre Miguel, E. (1993). Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 1st ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, p.294-307.
- [6] Miyara, F. (2004). Filtros activos. Cátedra de Electrónica III FCEIA-UNR. Rosario.
- [7] Tan, C. P., Teoh, K. S., & Jones, L. J. N. (2008). A review of Matlab's SISOTOOL; features and contributions to Control education. IFAC Proceedings Volumes, 41(2), 8473-8474.
- [8] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- [9] Iancu, I. (2012). A Mamdani type fuzzy logic controller. *Fuzzy logic-controls, concepts, theories and applications*, 15(2), 325-350.
- [10] Kaur, A., & Kaur, A. (2012). Comparison of mamdani-type and sugeno-type fuzzy inference systems for air conditioning system. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(2), 323-325.

## ANEXOS

### 1.- PROGRAMA DE MATLAB

```

%% ENCABEZADO
%*****
%           ESCUELA SIPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
%           MAESTRIA EN AUTOMATIZACION Y CONTROL INDUSTRIAL
%           VI COHORTE

%           TRABAJO DE TITULACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
%           DE MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

% TEMA:
% Análisis Comparativo Entre Controladores PID y FUZZY-PID Aplicados
% a Modelo Experimental Obtenido de un Filtro Activo Pasa-Bajos.

% AUTORES:
% ING. CARLOS PATRICIO ARROYO VILELA
% ING. LAURO FERNANDO SALVATIERRA BRAVO

% DIRECTOR:
% MGS. LIVINGTON MIRANDA
%*****

%% INICIALIZACION WORKSPACE
close all; % cierra todas las ventanas
clear all;% Borra todas las variables
clc;% Limpia la pantalla
load 'Filter_workspace.mat'

%% DEFINICION DEL MODELO EXPERIMENTAL
NUM=[0.34341];
DEN=[1 0.6654 0.6754];

%% REPRESENTACION DEL SISTEMA EN FUNCION DE TRANSFERENCIA
Gs=tf(NUM,DEN)
Gz=zpk(Gs)

%% DISEÑO DEL CONTROLADOR PID
%sisotool (Gz)
Kp=pid(C1).Kp % Constante Kp del controlador PID
Ki=pid(C1).Ki % Constante Ki del controlador PID
Kd=pid(C1).Kd % Constante Kd del controlador PID

%% SIMULACION
TesisAS = sim('modelAS2');

```

```

%% RESPUESTA NATURAL DEL SISTEMA
figure()
plot(TesisAS,InputSignal1.signals.values);
hold on;
plot(TesisAS,FilteredSignal1.signals.values);
title('Respuesta al escalón
unitario','fontweight','normal','fontangle','italic','Interpreter',.
..
'none','fontsize',16);
legend('In-ref','Out-sys');
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 0 1.2]);
grid on;

%% RESPUESTA CONTROLADOR PID
figure()
plot(TesisAS,InputSignal1.signals.values);
hold on;
plot(TesisAS,PIDSignal.signals.values);
title('Respuesta con Controlador
PID','fontweight','normal','fontangle','italic','Interpreter',...
'none','fontsize',16);
legend('In-ref','Out-PID');
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 0 1.25]);
grid on;%

%% ERROR Y SALIDA DEL CONTROLADOR PID

% ERROR PID
figure()
subplot(2,1,1)
plot(TesisAS,ErrorPID.signals.values,'r');
title('Error PID','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter',...
'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -0.3 1]);
grid on;

```

```

% SALIDA DE CONTROLADOR PID
subplot(2,1,2)
plot(TesisAS,SalidaPID.signals.values,'b');
title('Salida Controlador PID','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
ylabel('[%]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -20 100]);
grid on;

%% RESPUESTA CONTROLADOR FUZZY-PID
figure()
plot(TesisAS,InputSignal1.signals.values);
hold on;
plot(TesisAS,FuzzyPIDSignal.signals.values);
title('Respuesta con Controlador Fuzzy-
PID','fontweight','normal','fontangle','italic','Interpreter',...
      'none','fontsize',16);
legend('In-ref','Out-Fuzzy-PID')
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 0 1.25]);
grid on;%

%% ERROR Y SALIDA DEL CONTROLADOR FUZZY-PID

% ERROR FUZZY-PID
figure()
subplot(2,1,1)
plot(TesisAS,ErrorFuzzyPID.signals.values,'r');
title('Error Fuzzy-PID','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -0.3 1]);
grid on;
% SALIDA DE CONTROLADOR FUZZY-PID
subplot(2,1,2)
plot(TesisAS,SalidaFuzzyPID.signals.values,'b');
title('Salida Controlador Fuzzy-
PID','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
ylabel('[%]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -20 100]);
grid on;

```

```

%% PERTURBACION
figure()
plot(Perturbacion{1}.Values.Time,Perturbacion{1}.Values.Data,'m')
title('Perturbaci\`on','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16)
legend('Ruido Externo')
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16),ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter
','Latex','fontsize',16);
grid on;
%% RESPUESTAS DE CONTROLADOR PID Y CONTROLADOR FUZZY-PID A
PERTURBACION
figure()
plot(TesisAS,InputSignal1.signals.values);
hold on;
plot(TesisAS,PIDSignal.signals.values);
hold on;
plot(TesisAS,FuzzyPIDSignal.signals.values);
title('Respuesta a
Perturbaci\`on','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16)
legend('In-ref','Out-PID','Out-Fuzzy-PID')
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16),ylabel('[V]','fontweight','bold','Interpreter
','Latex','fontsize',16);
grid on;
%% RESPUESTAS DE CONTROLADOR PID Y CONTROLADOR FUZZY-PID A
PERTURBACION
figure()
subplot(2,1,1)
plot(TesisAS,SalidaPID.signals.values,'b');
title('Respuesta a Perturbaci\`on Controlador
PID','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16)
ylabel('[%]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -20 100]);
grid on;
subplot(2,1,2)
plot(TesisAS,SalidaFuzzyPID.signals.values,'b');
title('Respuesta a Perturbaci\`on Controlador Fuzzy-
PID','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16)
xlabel('[s]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16)
ylabel('[%]','fontweight','bold','Interpreter',...
      'Latex','fontsize',16);
axis([0 20 -20 100]);
grid on;

```