



**Universidad  
Israel**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL  
ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”**

**MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

*Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021*

**PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER**

<b>Título del proyecto:</b>
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES AVANZADOS CON LÓGICA DIFUSA APLICADOS A ESTACIONES DE PRUEBA DE PROCESOS INDUSTRIALES.
<b>Línea de Investigación:</b>
Automatización y control de procesos con aplicaciones en la industria
<b>Campo amplio de conocimiento:</b>
Ingeniería, industria y construcción.
<b>Autor/a:</b>
Erick Alexander Quimbita Panchi
<b>Tutor/a:</b>
Mg. René Ernesto Cortijo Leyva / PhD. Yolvy Javier Quintero Cordero

**Quito – Ecuador**

**2024**

## APROBACIÓN DEL TUTOR



Nosotros, Mg. **René Ernesto Cortijo Leyva** con C.I: **1719010108** y PhD. **Yolvy Quinteros Cordero** con C.I: **1759715301**, en calidad de Tutores del proyecto de investigación titulado: **“Diseño y simulación de controladores avanzados con lógica difusa aplicados a estaciones de prueba de procesos industriales”**

Elaborado por: **Erick Alexander Quimbita Panchi**, de C.I: **0502985575**, estudiante de la Maestría: **Electrónica y Automatización**, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, nos permitimos declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, se aprueba en todas sus partes.

Quito 10 de septiembre del 2024

---

**Firma**

**Tutor Técnico**

---

**Firma**

**Tutor Metodológico**

## DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, Erick Alexander Quimbita Panchi con C.I: 0502985575, autor/a del proyecto de titulación denominado: Diseño y simulación de controladores avanzados con lógica difusa aplicados a estaciones de prueba de procesos industriales. Previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y Automatización.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor@ del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
3. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 10 de septiembre del 2024

Firma

## Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR	2
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	3
INFORMACIÓN GENERAL	1
Contextualización del tema	1
Problema de investigación	2
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:	3
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
1.1. Contextualización general del estado del arte	4
1.2. Proceso investigativo metodológico	6
CAPÍTULO II: PROPUESTA	8
2.1 Fundamentos teóricos aplicados	8
2.2 Descripción de la propuesta	20
2.3 Validación de la propuesta	44
2.4 Matriz de articulación de la propuesta	45
2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.	48
<b>CONCLUSIONES</b>	63
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	68

## Índice de tablas

Tabla 1. Base de Reglas Difusas para los procesos a controlar.	17
Tabla 2. FAM (relación error, derror y salida)	31
Tabla 3. Matriz de articulación	46
Tabla 4. Resultados del Controlador Difuso del proceso de Presión.	48
Tabla 5. Resultados del Controlador Difuso del proceso de Flujo.	54
Tabla 6. Tabla comparativa del Control Difuso frente al Control PID aplicado al proceso de Presión.	60
Tabla 7. Tabla comparativa del Control Difuso frente al Control PID aplicado al proceso de Flujo.	62

## Índice de figuras

Figura 1. Función de transferencia obtenida del proceso de flujo	10
Figura 2. Función de transferencia obtenida a partir del proceso de presión	11
Figura 3. Lazo de un controlador difuso clásico	13
Figura 4. Función de pertenencia para la variable de entrada error	15
Figura 5. Función de pertenencia para la variable de entrada derivada del error	16
Figura 6. Función de pertenencia para la salida	16
Figura 7. Esquema general del proyecto	21
Figura 8. Representación matemática de la función de pertenencia NG de la entrada "error"	23
Figura 9. Representación matemática de la función de pertenencia NP de la entrada "error"	24
Figura 10. Representación matemática de la función de pertenencia Z de la entrada "error"	24
Figura 11. Representación matemática de la función de pertenencia PP de la entrada "error"	24
Figura 12. Representación matemática de la función de pertenencia PG de la entrada "error"	25
Figura 13. Representación matemática de la función de pertenencia NG de la entrada "derivada del error"	25
Figura 14. Representación matemática de la función de pertenencia NP de la entrada "derivada del error"	26
Figura 15. Representación matemática de la función de pertenencia Z de la entrada "derivada del error"	26
Figura 16. Representación matemática de la función de pertenencia PP de la entrada "derivada del error"	26
Figura 17. Representación matemática de la función de pertenencia PG de la entrada "derivada del error"	27
Figura 18. Representación matemática de la función de pertenencia NG de la salida	27
Figura 19. Representación matemática de la función de pertenencia NM de la salida	28
Figura 20. Representación matemática de la función de pertenencia NP de la salida	28
Figura 21. Representación matemática de la función de pertenencia Z de la salida	28
Figura 22. Representación matemática de la función de pertenencia PP de la salida	29
Figura 23. Representación matemática de la función de pertenencia PM de la salida	29
Figura 24. Representación matemática de la función de pertenencia PG de la salida	29
Figura 25. Creación de proyecto en Labview	34
Figura 26. Generación de un nuevo VI para programación	35
Figura 27. Panel Frontal y Diagrama de bloques del VI.	35

Figura 28. HMI para planta de presión	36
Figura 29. HMI para el proceso de flujo	37
Figura 30. Interfaz Fuzzy System Designer.	38
Figura 31. Creación variable error y su función de membresía	39
Figura 32. Creación variable derivada del error y su función de membresía	39
Figura 33. Creación variable salida del sistema y su función de membresía	40
Figura 34. Creación de reglas difusas para los sistemas de flujo y presión	40
Figura 35. Testeo de Controlador difuso	41
Figura 36. Estructura Control & Simulation Loop	42
Figura 37. Controlador difuso del proceso de flujo	42
Figura 38. Controlador difuso del proceso de presión	43
Figura 39. Controladores PID y Difuso de la planta de flujo	43
Figura 40. Controladores PID y Difuso de la planta de presión	44
Figura 41. Ecuación porcentaje de error	48
Figura 42. Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 50)	49
Figura 43. Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 20)	50
Figura 44. Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 45)	51
Figura 45. Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 25)	52
Figura 46. Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 35)	53
Figura 47. Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 45)	55
Figura 48. Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 18)	56
Figura 49. Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 38)	57
Figura 50. Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 28)	58
Figura 51. Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 12)	59
Figura 52. Tiempos de estabilización vs SP en el proceso de Presión	60
Figura 53. Porcentaje de error vs SP en el proceso de Presión	61
Figura 54. Tiempos de estabilización vs SP en el proceso de Flujo	62
Figura 55. Porcentaje de error vs SP en el proceso de Flujo.	63

## INFORMACIÓN GENERAL

### Contextualización del tema

En la actualidad el desarrollo de la tecnología específicamente en el ámbito industrial ha demostrado que los algoritmos de control tradicionales están quedando obsoletos en comparación a los nuevos controladores como son los casos de los controles avanzados e inteligentes, ya que han mejorado notablemente en comparación de sus antecesores en tiempos de respuesta de estabilización ante perturbaciones propias de un proceso industrial y debido a las necesidades de mejorar la precisión y robustez del control en sistemas complejos o no lineales (procesos típicos en la industria). En nuestro país gran porcentaje de la industria aún emplea controladores tradicionales (PID) que ha futuro podría ser un limitante para el desarrollo y actualización de la automatización de procesos industriales, por lo que se plantea este estudio de comparación de este tipo de controladores versus los nuevos métodos de control (Inteligente).

Con el fin de validar los tiempos de reacción a los procedimientos sugeridos en dos plantas con procesos industriales de prueba distintos, este proyecto de trabajo presenta el diseño y modelado de un controlador difuso. En la simulación se utiliza el software Matlab tanto para la creación del algoritmo de control como para el modelado de la planta industrial. Con el uso de Matlab IDENT toolbox, el enfoque de identificación produce un modelo matemático de las plantas que se puede utilizar para imitar los diversos procesos. El software LabVIEW se utiliza para el diseño de controladores, junto con bibliotecas como Control Desing, entre otras, para producir salidas gráficas de controladores que pueden compararse.

El dispositivo de control es un dispositivo integrado FPGA, que comparte muchas características con un CompactRIO, incluidas capacidades de procesamiento de alto rendimiento, E/S condicionadas específicas de sensores y varias herramientas de software integradas que los hacen perfectos para aplicaciones de control y supervisión en el Internet industrial de las cosas (IIoT). El procesador en tiempo real hace posible un comportamiento predecible y fiable, mientras que las actividades diminutas que requieren una lógica rápida y una temporización exacta son más adecuadas para la FPGA.

Los algoritmos diseñados son comparados con controles PID, y se evidencia un mejor desempeño tanto en tiempos de respuesta como de estabilización.



## **Problema de investigación**

Actualmente, en la industria la automatización de sistemas en su mayor parte se utilizan controles tradicionales específicamente PID, frente a los controles avanzados que existen actualmente, los tradicionales quedan obsoletos. Los controladores avanzados específicamente el Control Difuso se presentan actualmente como una opción de innovación en la industria, en parámetros de control de respuesta, tiempo de estabilización.

Dado que los controladores tradicionales no pueden satisfacer completamente las demandas de procesos complejos, se han desarrollado varios controladores avanzados, como la Lógica Difusa (Fuzzy Logic). Este tipo de controlador se fundamenta en la comparación de antecedentes con conjuntos predefinidos para determinar una respuesta, conocida como consecuente.

Por esta razón, la innovación en la industria es crucial, dado que la lógica difusa se aplica para resolver diversos problemas, especialmente aquellos asociados con el control de procesos complejos y sistemas de toma de decisiones en general. Los controles que emplean lógica difusa replican el proceso de toma de decisiones humanas, pero con la ventaja de hacerlo de manera mucho más rápida. En este proyecto, se presenta la metodología y el procedimiento para implementar controladores basados en lógica difusa.

Si la industria en Ecuador no se actualiza a tecnologías avanzadas de control de procesos inteligentes, como los sistemas de lógica difusa, podría enfrentar varios desafíos significativos que pueden afectar su competitividad, eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

## **Objetivo general**

Diseñar controladores avanzados con lógica difusa aplicados a estaciones de prueba de procesos industriales, comparando las ventajas frente a controladores PID.

## **Objetivos específicos**

- Situar los fundamentos teóricos de identificación de modelos matemáticos, inteligencia artificial, la programación de control difuso en LabVIEW y dispositivos de control.
- Identificar modelos matemáticos de planta de pruebas con el software Matlab.
- Desarrollar controladores basados en lógica difusa y controladores PID para los procesos que se van a evaluar.
- Simular los controladores basados en lógica difusa y controladores PID para los procesos que se van a analizar.
- Validar pruebas de funcionamiento de los controladores

## **Vinculación con la sociedad y beneficiarios**

Este proyecto beneficia a la sociedad en ámbitos como la transferencia de tecnología a la industria, ya que pueden formarse asociaciones para transferir esta tecnología a las empresas del sector una vez que se hayan creado y validado controladores mejorados con lógica difusa en estaciones de prueba de procesos industriales. De este modo, las empresas podrán integrar estas innovaciones en sus procesos industriales, lo que puede suponer un ahorro de costes, un aumento de la productividad y una mayor competitividad de la industria en general. Se pueden organizar talleres, seminarios o cursos de formación sobre el diseño y la aplicación de controladores avanzados de lógica difusa en estaciones de prueba de procesos industriales para estudiantes universitarios y profesionales de la industria, en un esfuerzo por ayudar a difundir los conocimientos producidos por esta investigación.

Divulgación Científica y Sensibilización: Realizar actividades de divulgación científica, como charlas, exposiciones o publicaciones en medios de comunicación, para informar al público en general sobre los avances en el diseño y la simulación de controladores avanzados con lógica difusa y su aplicación en la mejora de los procesos industriales. Ello contribuirá a que el público comprenda mejor la importancia de la innovación técnica en las empresas y su influencia en el progreso social y económico.

## CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1. Contextualización general del estado del arte

La importancia de la eficiencia y eficacia en el Control de Procesos Industriales es en la actualidad un tema de muy alta relevancia, ya que, en dicho entorno, el control preciso de procesos es crucial para garantizar la calidad del producto, la eficiencia energética y la seguridad operativa. Los métodos de control convencionales como los controladores PID pueden enfrentar limitaciones en sistemas complejos con dinámicas no lineales o variables. La lógica difusa ofrece un marco flexible que puede manejar la incertidumbre y la imprecisión inherentes en muchos procesos industriales.

En su investigación, Gutiérrez (2024) señala que la búsqueda de alternativas para simular y controlar procesos sin utilizar las instalaciones físicas ha sido provocada por la dependencia del hardware disponible en los laboratorios de automatización y control de la ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria. En este laboratorio se modelará el control de nivel de tanques y el control de posición de motores de corriente continua utilizando el entorno de programación MATLAB y Simulink, herramienta que lo acompaña. Esta información se utilizará para modelar las plantas con el fin de diseñar y simular controladores difusos.

Por otro lado, (Ghia & Rivera, 2024) en su estudio aclaran que el objetivo de su controlador es gestionar la velocidad del motor de CC para que permanezca constante de acuerdo con los requisitos particulares del usuario. A través de su interfaz gráfica de usuario, LabVIEW facilita la visualización y modificación de los ajustes, permitiendo la monitorización del rendimiento en tiempo real y la optimización del sistema. Basándonos en esta idea, hemos optado por utilizar LabVIEW como plataforma de diseño para nuestro controlador difuso debido a su amplio entorno y a su compatibilidad con aplicaciones en tiempo real, lo que facilita el análisis gráfico de tendencias.

(Muniz, 2024) menciona en su artículo que, en la era digital actual, la fusión entre la inteligencia artificial (IA) y el diseño industrial está revolucionando los límites de la creatividad y la eficiencia en el desarrollo de productos. La IA, con su habilidad para analizar grandes volúmenes de datos, detectar patrones y prever resultados, está emergiendo como un aliado esencial en el diseño industrial. Desde la etapa de conceptualización hasta la producción, la integración de la IA está cambiando drásticamente la manera en que los diseñadores enfrentan desafíos y toman decisiones a lo largo del tiempo de vida útil del producto. Los controladores difusos y la inteligencia artificial están íntimamente relacionados, ya que ambos abordan

problemas complejos de control y toma de decisiones mediante métodos que replican el razonamiento humano.

En su proyecto de titulación (Roldan & Reyes, 2021) plantea una mejora en el proceso educativo específicamente en técnicas de control y automatización, donde proponen el diseño de un controlador de lógica difusa, para lo cual emplean un PLC como dispositivo de control, el cual se encarga de controlar una planta de nivel el mismo que es enlazado a un sistema SCADA a través de una red Profinet, como software de programación utilizan LabVIEW el mismo que presta muchas facilidades de programación como lo es la técnica de “Programación orientada a objetos”

De igual manera, Paul Jácome (2022) propone un diseño de control basado en las experiencias de los operarios en una planta de bombeo de hidrocarburos, proporcionando una perspectiva objetiva para el desarrollo de un sistema experto que facilite el monitoreo y la toma de decisiones en caso de fallas en el oleoducto de crudo. Para este propósito, sugiere utilizar un control basado en lógica difusa en combinación con "máquinas de estados" modeladas en Simulink de Matlab. Además, el enfoque incluye la integración con el Internet de las Cosas, aplicando esta tecnología para capturar datos de transmisores de presión en las válvulas de seguridad mediante una Raspberry Pi, y enviarlos a la nube usando el protocolo MQTT. Una vez en la nube, estos datos se recogen en la estación de transferencia de hidrocarburos, donde se procesan en tiempo real utilizando un sistema experto.

Integrar lógica difusa con máquinas de estados en Simulink, junto con la incorporación del Internet de las Cosas (Iota), ofrece un método avanzado para el control de procesos industriales. La implementación en una planta de bombeo y la recopilación de datos en tiempo real pueden servir como inspiración sobre cómo aplicar controladores difusos en sistemas complejos y cómo utilizar IoT para optimizar la supervisión y el control.

## 1.2. Proceso investigativo metodológico

En este proyecto se ha usado el enfoque de investigación mixto, ya que integra tanto una investigación cuantitativa como cualitativa.

En el modelamiento de procesos industriales se usa el método de investigación cuantitativa y la técnica de observación estructurada, ya que a partir de un universo de datos (Magnitudes eléctricas), se realiza la obtención de un modelo matemático que nos permite generar y simular una planta para posteriormente diseñar el control de proceso correspondiente.

Para el diseño de control de procesos se usó el método de investigación cualitativa, en donde nos enfocamos en comprender la necesidad de mejora del control de procesos a través del análisis de manuales de operación de controles tradicionales y el análisis de las tendencias y características de control, de esta manera podemos verificar a través de una simulación el funcionamiento del controlador con el algoritmo implementado, incluso generar perturbaciones y mediante la técnica de observación directa identificar en las tendencias del proceso el grado de mejora de los controladores avanzados implementados frente a los controladores tradicionales.

La población del proyecto Diseño y simulación de controladores difusos aplicados a procesos industriales, está compuesta por los procesos industriales en los que se implementarán los controladores difusos, los sistemas y componentes que se modelarán y simularán, los datos obtenidos de estas simulaciones y los diferentes escenarios de aplicación para probar los controladores.

El tipo de muestra usado es el muestreo sistemático aleatorio simple y estratificado, como muestra incluimos la selección de los procesos Industriales de presión y flujo donde aplicaremos los controles, como sistemas de Control implementaremos el control de lógica difusa y el control PID, para la respectiva comparación.

Adicionalmente se aplican varios métodos de análisis y técnicas para desarrollar, evaluar y validar los controladores difusos, en cuestión de la metodología de análisis se estructuró de la siguiente manera, se realiza un análisis teórico que incluye el estudio de los principios fundamentales de la lógica difusa y su aplicación en el control de procesos. Esto puede involucrar la revisión de literatura, análisis de algoritmos de control difuso, y la formulación de modelos teóricos. El análisis de los sistemas de control evalúa el comportamiento de los controladores difusos, incluye el análisis de la estabilidad el rendimiento y la robustez del sistema.

Las técnicas para diseño y simulación usadas incluyen la definición de variables de entrada, salida, la creación de funciones de membresía y formulación de reglas difusas, para la simulación del sistema usamos herramientas tecnológicas para generar un modelo matemático a partir de datos experimentales.

El instrumento de investigación a utilizar es una combinación de cualitativos y cuantitativos, ya que en el desarrollo del mismo usamos algunas herramientas, como por ejemplo en la obtención de modelo matemático nos sirvió el Software Matlab, así mismo otra herramienta para el diseño de controladores se usó el LabVIEW que ofrece Un entorno de desarrollo para aplicaciones de adquisición de datos, instrumentación y control y puede utilizado para diseñar sistemas de control difuso y realizar simulaciones en un entorno gráfico. También hardware para la recolección de datos como las plantas de prueba, el dispositivo de control, actuadores y transmisores. Estos instrumentos permiten diseñar, simular, y evaluar el desempeño de los controladores difusos, facilitando el análisis de su eficacia en la mejora de procesos industriales.

## **CAPÍTULO II: PROPUESTA**

### **2.1 Fundamentos teóricos aplicados**

En la actualidad las aplicaciones industriales de la lógica difusa demuestran su flexibilidad y eficacia en la gestión de sistemas complejos. Se utiliza en sistemas de control de temperatura de máquinas, control de aire acondicionado y calefacción, y en el control de procesos industriales (hornos, calderas, etc.).

En este proyecto se enfoca el aplicativo específicamente al diseño y simulación de control de procesos industriales para lo cual es necesario el conocimiento de ciertos conceptos y procesos para el desarrollo de este.

#### **2.1.1 Modelamiento de plantas industriales**

En la industria existen varios procesos con sistemas complejos no son necesariamente lineales, por lo que matemáticamente es imposible definir una función de transferencia o modelo matemático sin el uso de herramientas que permitan la trazabilidad de este, para lo cual se emplea algoritmos matemáticos que permiten llegar a una función que gradualmente representa la naturaleza de la planta en la que deseemos trabajar.

Podemos definir dos métodos de modelamiento e identificación de procesos:

##### **2.1.1.1 Modelamiento**

Utilizando este método, las ecuaciones del modelo que describen cómo funciona y se comporta el proceso pueden derivarse de los fundamentos de leyes fisicoquímicas.

Estos modelos tienen una validez muy amplia, lo que significa que pueden reflejar el comportamiento del sistema en muchos puntos de funcionamiento. Sin embargo, debido a su complejidad, estos modelos son más adecuados para la simulación y el diseño de plantas.

##### **2.1.1.2 Identificación**

Esta técnica se refiere a la obtención de modelos dinámicos o ecuaciones que permiten describir el comportamiento de un proceso a partir del estudio de sus señales de entrada y salida, podría contextualizarse como la técnica de construcción de modelos a partir de datos experimentales del proceso, con el fin de obtener herramientas fundamentales en el diseño de sistemas de control.

### **2.1.1.3 Proceso de Identificación de modelos.**

Elija un subconjunto de entradas y salidas del sistema o proceso, teniendo en cuenta que la calidad de los datos recogidos es importante porque el nivel de fiabilidad del modelo sólo se basará en ellos.

- Comprobar los datos recopilados, eliminando cualquier patrón o anomalía que no correspondan al funcionamiento del proceso.
- Elegir el enfoque de identificación en función del proceso; las opciones incluyen estructuras de tipo caja negra, modelado semi físico y modelado físico.
- La discrepancia entre la salida real del sistema y la salida de su modelo debe ser la menor posible para cumplir el requisito de ajuste.
- Verifique el modelo y todas sus incertidumbres antes de pasar a la aplicación para asegurarse de que el modelo es sólido.
- Vuelva a las etapas anteriores y ajuste la identificación, la estructura del modelo, la metodología o los datos experimentales si la respuesta no se ajusta a los requisitos necesarios.

El filtrado y el análisis de los datos son cruciales para la identificación, ya que permiten comparar las características y confirmar el modelo desarrollado. El espectro de potencia de las señales relevantes y las funciones de correlación pueden utilizarse gracias a este estudio. Sin embargo, el filtrado es esencial para eliminar del modelo los datos indeseables e ilógicos, como los sonidos de alta frecuencia y las perturbaciones no deseadas.

### **2.1.2 Matlab y su herramienta IDENT**

Para modelar sistemas dinámicos, evaluar series temporales y generar predicciones, el conjunto de herramientas de identificación de sistemas ofrece una colección de herramientas de MATLAB, bloques de Simulink y una aplicación especializada. Utilizando datos en el dominio del tiempo o de la frecuencia, este conjunto de herramientas permite encontrar vínculos dinámicos entre las variables medidas para crear modelos de espacio de estados, modelos de sistemas o procesos y funciones de transferencia en dominios continuos y discretos. Además, permite la predicción de series temporales mediante el uso de enfoques de modelado autorregresivo lineal y no lineal, como AR, ARMA y otros.

Mediante el uso de modelos no lineales de Hammerstein-Wiener y ARX, la caja de herramientas facilita la estimación de la dinámica de sistemas no lineales utilizando técnicas de



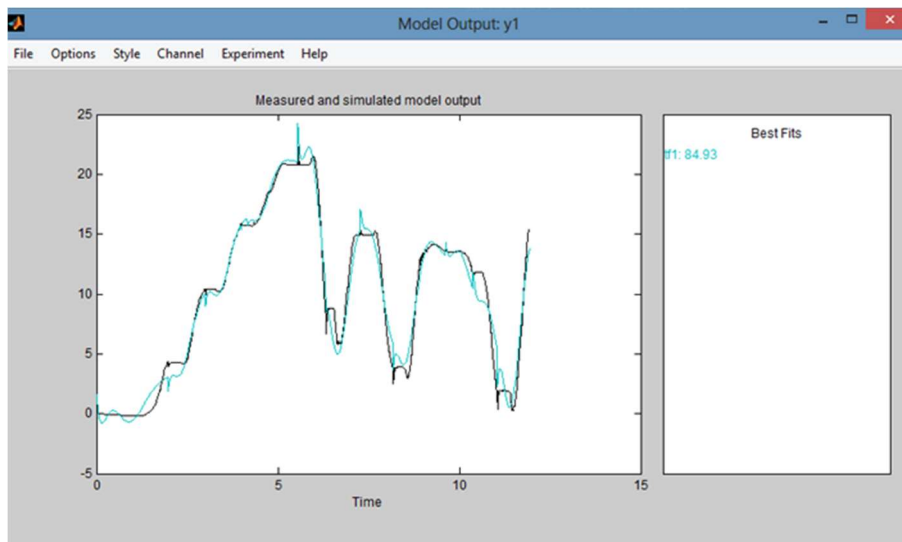
aprendizaje automático que incluyen máquinas de vectores soporte (SVM), procesos gaussianos (GP) y otras representaciones. Para los casos que requieran, se pueden crear modelos neuronales de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) usando aprendizaje profundo para capturar la dinámica de sistemas no lineales. Además, la toolbox permite realizar identificación de modelos matemáticos para estimar parámetros de modelos definidos por el operador. Los modelos identificados pueden integrarse en Simulink para simulaciones rápidas y aplicaciones en diseño de control, diagnóstico y pronóstico.

También ofrece la capacidad de estimar parámetros y estados en tiempo real utilizando filtros de Kalman extendidos, y filtros de partículas, útiles para aplicaciones de control adaptativo, detección de anomalías y sensores virtuales. Asimismo, es posible generar código en C/C++ para algoritmos de estimación en tiempo real destinados a dispositivos integrados.

Para la obtención del modelo matemático se utiliza la herramienta tecnológica MATLAB con su toolbox IDENT, el mismo que a partir de datos experimentales de entrada y salida devuelve una función de transferencia (Modelo Matemático), esta función de transferencia nos permite realizar pruebas para el diseño de los controladores.

**Figura 1.**

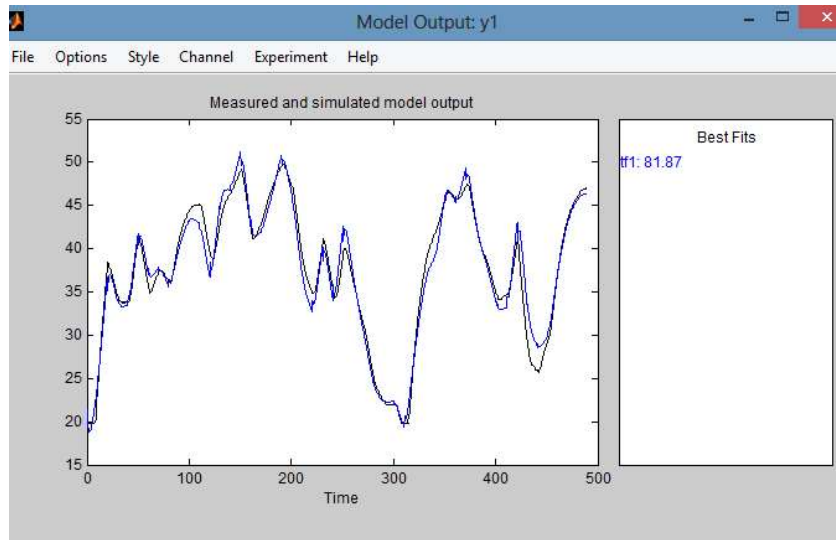
*Función de transferencia obtenida del proceso de flujo*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

**Figura 2.**

*Función de transferencia obtenida a partir del proceso de presión*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las funciones de transferencia obtenidas para la planta de flujo y presión respectivamente son:

Planta de presión 
$$\frac{77,602176s + 0,5712}{898,430580579s^3 + 637,883839s^2 + 49,3089s + 1}$$

Planta de flujo 
$$\frac{-0,1293s^3 + 0,1402s^2 + 0,005864s + 0,000373}{s^4 + 0,479s^3 + 0,1885s^2 + 0,00524s + 0,0004462}$$

### 2.1.3 Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) es una tecnología que permite a los dispositivos o máquinas emular el pensamiento y el aprendizaje humano. En términos sencillos, se trata de cuando computadoras y otros dispositivos pueden llevar a cabo tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como comprender el lenguaje, identificar imágenes, tomar decisiones o resolver problemas.

Por ejemplo, un asistente virtual en un teléfono celular que puede responder a preguntas, recomendar música o ayudar con tareas, eso es un ejemplo de IA en funcionamiento. La IA aprende a partir de la información que recibe y mejora en esas tareas con el tiempo.

La ciencia de la inteligencia artificial se compone de varios elementos, de los que pueden identificarse tres campos:

- Redes neuronales artificiales
- Lógica difusa
- Algoritmos genéticos

#### **2.1.4 Lógica Difusa**

La inteligencia artificial ha dado lugar a un campo llamado lógica difusa, que permite a los ordenadores evaluar datos del mundo real en términos de grados de veracidad, en lugar de limitarse a un binario estricto de verdadero o falso. En la década de 1920, matemáticos centrados en la lógica establecieron una idea fundamental: todo es cuestión de grados. Los ingenieros pueden crear aparatos como aires acondicionados, lavadoras, televisores y otros artilugios más fácilmente cuando utilizan la lógica difusa, que opera con nociones imprecisas como «caliente» y «húmedo». Estos aparatos necesitan la evaluación de datos difíciles de caracterizar adecuadamente. Los sistemas basados en la lógica difusa ofrecen una alternativa a las ideas convencionales de pertenencia y lógica, que tienen sus raíces en la Grecia clásica.

El lenguaje natural utiliza ideas imprecisas como «el precio es alto» o «hace frío». Al traducir el lenguaje humano a la lógica clásica se pierde una cantidad considerable de sutileza y significado, lo que puede resultar problemático para desarrollar un sistema experto. Por ejemplo, si se diseña un sistema experto para imitar las habilidades de diagnóstico de un médico, el diagnóstico y la recomendación de medicación están plagados de imprecisión, aunque se esté consciente de que el médico depende de mediciones exactas.

La lógica difusa permite a los matemáticos gobernar o describir un sistema utilizando principios de sentido común que se refieren a cantidades imprecisas en situaciones en las que carecen de algoritmos explícitos que especifiquen cómo debe reaccionar el sistema ante determinadas entradas. Los sistemas difusos suelen incluir reglas desarrolladas por expertos; en ausencia de un experto, los sistemas difusos adaptativos adquieren reglas observando cómo interactúan los usuarios con sistemas reales.

#### 2.1.4.1 Estructura de un controlador difuso

Los siguientes componentes conforman la estructura fundamental de un controlador difuso:

**Reglas:** Estas reglas, que se derivan del conocimiento experto, especifican la propensión de las acciones de control a realizarse. La lógica difusa se basa en las relaciones que conforman las reglas; estas relaciones se determinan mediante el cálculo de reglas «SI-ENTONCES». Con este método, las características cualitativas del conocimiento humano y los procesos de razonamiento pueden modelarse sin necesidad de un análisis cuantitativo preciso. Una regla puede ser: «El motor del coche debe frenarse si la velocidad es alta».

**Fusificador:** La conexión entre las entradas genuinas y difusas del sistema se conoce como fusificador. Para que las reglas utilicen cualquier entrada, tiene que haber una relación entre todas ellas.

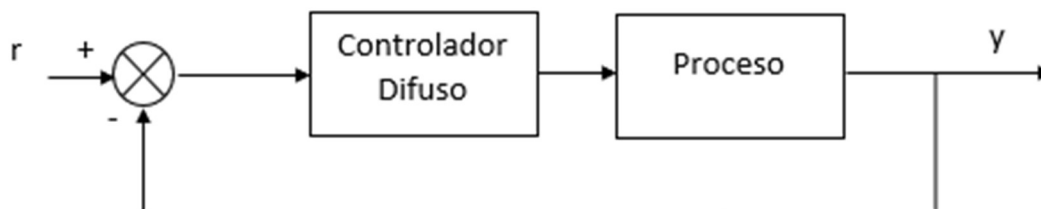
**Defusificador:** da una salida verdadera del sistema dado un valor difuso derivado de las reglas.

#### 2.1.4.2 Control difuso clásico

Debido a su lazo de control (Figura 3), los controles difusos clásicos son comparables a los controladores industriales clásicos en el sentido de que pueden diseñarse con acciones proporcionales (P), proporcionales-derivativas (PD), proporcionales-integrales (PI) y proporcionales-integrales-derivativas (PID).

Figura 3.

*Lazo de un controlador difuso clásico*



Nota: Elaboración propia, 2024

Para este proyecto la estructura del diseño de controladores difusos lo dividimos en tres etapas:

- Fusificación
- Generación reglas o inferencia
- Defusificación

### **Proceso de Presión**

En el diseño del control difuso para el proceso de presión se establecieron los siguientes parámetros:

- La planta de presión se modela en un rango de medición de 0 a 50 (PSI).
- Mandami es el enfoque de controlador difuso que se emplea.
- El tipo de sistema será un MISO (múltiples entradas y una salida), y las variables de entrada y salida se definen como sigue: el error y su derivada.

Para mayor comodidad e implicación en el proceso y cálculo de este tipo triangular y trapezoidal, se dan funciones de pertenencia a ambas variables de entrada y salida.

### **Proceso de Flujo**

En el diseño del control difuso para el proceso de caudal se establecieron los siguientes parámetros:

- La planta de flujo se modela en un rango de medición entre 0 a 45 litros por minuto (LPM).
- Mandami es el enfoque de controlador difuso que se emplea.
- El tipo de sistema será un MISO (múltiples entradas y una salida), y las variables de entrada y salida se definen como sigue: el error y su derivada.

Para mayor comodidad e implicación en el proceso y cálculo de este tipo triangular y trapezoidal, se dan funciones de pertenencia a ambas variables de entrada y salida.

### Funciones de pertenencia para los controladores de los procesos a implementar

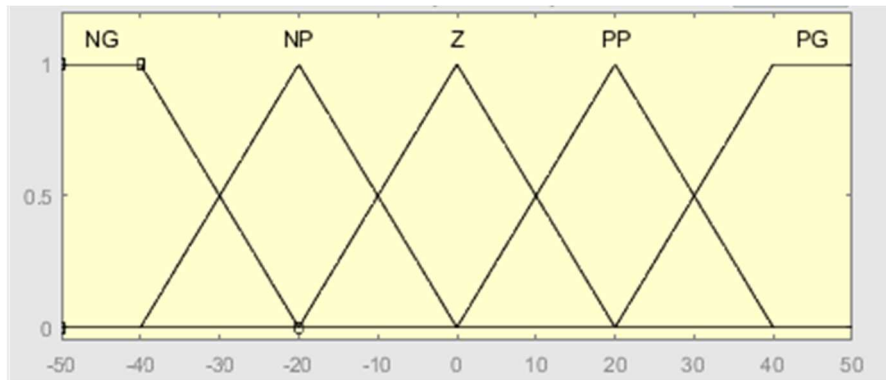
Se dan valores lingüísticos tanto para las variables de entrada como para la salida en este caso se define de la siguiente manera.

Dentro del rango de medición del proceso se va dando un nombre a cada función de membresía donde:

- NG se refiere a Negativo Grande
- NM se refiere a Negativo Medio
- NP se refiere a Negativo Pequeño
- Z se refiere a Cero
- PP se refiere a Positivo Pequeño
- PM se refiere a Positivo Medio
- PG se refiere a Positivo Grande

**Figura 4.**

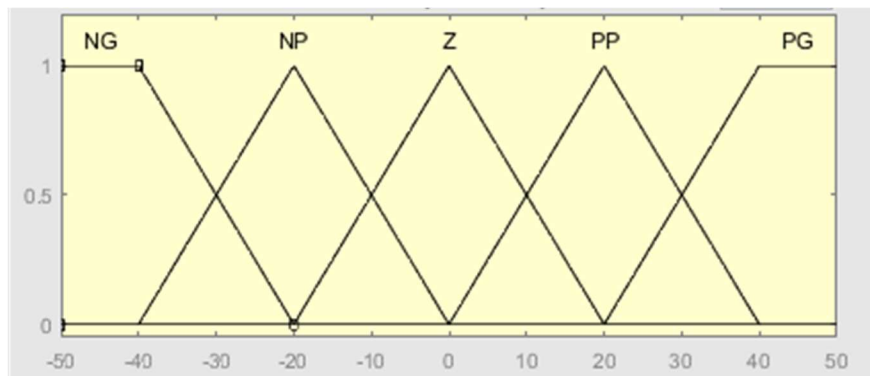
*Función de pertenencia para la variable de entrada error*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

**Figura 5.**

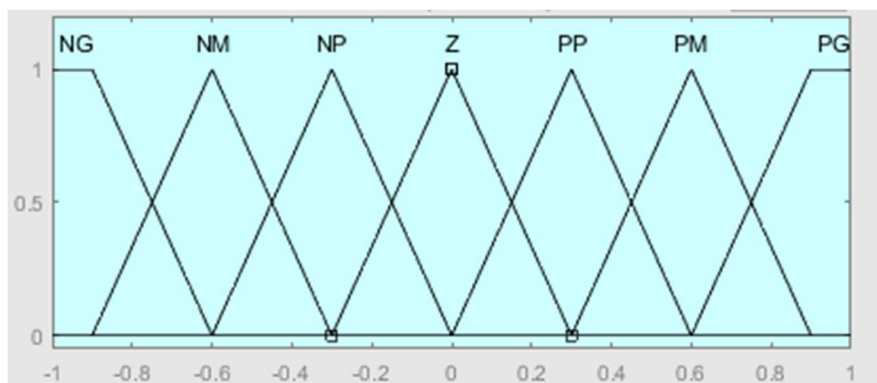
*Función de pertenencia para la variable de entrada derivada del error*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

**Figura 6.**

*Función de pertenencia para la salida*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

### **Reglas Difusas para los controladores de los procesos a implementar**

Las reglas difusas se crean a partir de la matriz de reglas difusas (FAM). Estas reglas se conectan a las entradas y salidas en función del conocimiento previo y de la inercia del controlador. Por ejemplo, la matriz se forma de la siguiente manera: Si el error es negativo, la salida debe ser negativa.

**Tabla 1.**

*Base de Reglas Difusas para los procesos a controlar.*

<b>de(t)/e(t)</b>	<b>NG</b>	<b>NP</b>	<b>Z</b>	<b>PP</b>	<b>PG</b>
<b>NG</b>	NG	NG	NM	NP	Z
<b>NP</b>	NG	NM	NP	Z	PP
<b>Z</b>	NM	NP	Z	PP	PM
<b>PP</b>	NP	Z	PP	PM	PG
<b>PG</b>	Z	PP	PM	PG	PG

Fuente: Elaboración propia, 2024.

### **Método de Defusificación de los controladores difusos de los procesos aplicados**

Por último, ejecutamos el proceso inverso de fusificación para adquirir la salida del controlador. Hay otras formas de realizar esto, pero para nuestra planta, elegimos la técnica del centroide, también conocida como el método del centro de gravedad, ya que es el enfoque más popular para utilizar controladores difusos.

#### **2.1.5 Controlador Industrial**

Se denomina controlador industrial a todo aparato o sistema técnico que facilita la automatización de los procesos de producción en un amplio abanico de empresas e industrias.

Los controladores tratan de maximizar la eficacia de cada trabajo realizado por los empleados y las máquinas en las empresas. Para ello, recopilan diversos tipos de datos y estadísticas, que luego utilizan para elaborar planes y soluciones que aumenten la productividad general. Esto implica reducir los posibles fallos y averías de las máquinas, así como el tiempo necesario para realizar diversas tareas de forma automática.

En la automatización industrial se utilizan tres tipos principales de controladores: los sistemas de control distribuido (DCS), los controladores de automatización programables (PAC) y los controladores lógicos programables (PLC).

##### **2.1.5.1 PAC (Controladores programables de Automatización)**

Dado que los PAC sólo necesitan un ordenador de sobremesa potente para funcionar, a diferencia de los PLC y DCS, que dependen de software propietario, estos controladores industriales son posiblemente los más adaptables. No sólo tienen un rendimiento y una longevidad superiores, sino que también funcionan mejor en una gama más amplia de entornos.



Con la tecnología de procesamiento más avanzada disponible, los PACs de National Instruments pueden manejar problemas de control desafiantes en entornos industriales difíciles. Con NI LabVIEW, un entorno de desarrollo gráfico integrado, un PAC de NI puede programarse completamente.

#### **2.1.5.2 NI CompactRIO**

Los sistemas CompactRIO proporcionan un alto rendimiento en procesamiento, entradas y salidas especializadas para sensores, y un conjunto de herramientas de software altamente integrado, lo que los hace ideales para aplicaciones del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), así como para monitoreo y control. El procesador en tiempo real garantiza un funcionamiento confiable y predecible, mientras que el FPGA destaca en la ejecución de tareas menores que demandan lógica de alta velocidad y precisión en la temporización.

#### **2.1.6 LABVIEW EN LA INDUSTRIA**

La industria actual se caracteriza por su continua evolución y la búsqueda de soluciones cada vez más eficaces para mejorar los procesos y controlar los sistemas industriales de manera eficiente. En este contexto, LabVIEW se ha convertido en una de las herramientas más robustas y versátiles para el desarrollo de sistemas de gestión y control industrial.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software de desarrollo de sistemas de gestión y control industrial creada por NI (National Instruments). Este software se ha convertido en un estándar en la industria debido a su capacidad para crear sistemas de control, adquisición de datos y automatización de procesos de manera eficiente.

Ofrece numerosas ventajas como diseño de HMI, entorno de desarrollo gráfico, compatibilidad de hardware, librerías y módulos predefinidos, entre otros. Además, se emplea en diversos sectores industriales, tales como la automatización de procesos, la robótica, la supervisión de sistemas de energía, la instrumentación médica y la investigación científica. Su versatilidad lo convierte en una opción adecuada para una extensa gama de aplicaciones.

Para el diseño de controladores inteligentes, LabVIEW ofrece herramientas como el que se usó en este proyecto que es el Control Design and Simulation Module, permite el diseño total del controlador.

### **2.1.7 Estaciones de pruebas de procesos Industriales**

Las estaciones de laboratorio usadas son puestos de trabajo equipados para la instrucción práctica en medición, control y mantenimiento, incluyen los procesos de presión, caudal, temperatura y nivel, incluyen actuadores, transmisores entre otros. Las estaciones pueden funcionar por separado o combinadas para reproducir procedimientos intrincados vistos en el sector industrial.

#### **2.1.7.1 Planta de Proceso de Presión**

La planta de presión cuenta con depósitos de aire de dos galones de capacidad que componen el Proceso a Presión como parte de un sistema. Es posible conectar estos tanques solos, en serie o en paralelo. Se puede conseguir un procedimiento con un volumen y capacidad únicos y el tiempo de reacción más corto utilizando uno de los tanques de forma independiente. Cuando los dos tanques se conectan en paralelo, el volumen del proceso se duplica. En cambio, cuando se conectan en serie se produce un proceso con el doble de capacidad y una latencia de reacción recíproca.

Además, se instalan válvulas de aguja en las conexiones de carga y depósito de la estación. Estas válvulas proporcionan velocidades de proceso y respuestas variables creando interrupciones en la demanda y el suministro de presión y modificando el grado de restricciones en todos los diseños de bucle cerrado.

#### **2.1.7.2 Planta de Proceso de Flujo**

La regulación del caudal de un líquido a través de una tubería se demuestra con la estación de proceso de caudal. Una bomba de esta estación de caudal está controlada por un variador de frecuencia. El regulador envía una señal a esta bomba que oscila entre 4 y 20 mA.

La bomba puede modificar el caudal de agua en el sensor de tipo placa de orificio de acuerdo con unas directrices predeterminadas. Un transmisor de presión diferencial situado dentro de la tubería de proceso detecta el caudal de agua y transmite la señal asociada, que es una señal normalizada, al controlador en el rango de 4 a 20 mA.

## 2.2 Descripción de la propuesta

Describe el producto de la propuesta tomando en cuenta:

Se plantea el diseño y simulación de dos controladores de lógica difusa aplicados a estaciones de prueba de presión y flujo, para ser comparados con controladores de control PID.

En primera instancia se realiza la obtención de datos experimentales de las plantas de procesos, para lo cual se usó una tarjeta FPGA la misma que permite enlazarnos con los dispositivos de la planta, a través del software LabVIEW enlazamos la comunicación entre la FPGA el PC y la planta de pruebas, mediante un HMI se transmiten datos de entrada que son procesados por la FPGA y con un transductor llegan al actuador de la planta, a su vez el transmisor de la planta genera un dato a la salida, se realiza este proceso experimental para generar una base de datos con el fin de ser procesados en MATLAB y obtener un modelo matemático.

Tras la obtención del modelado, se utiliza la herramienta LabVIEW para diseñar y desarrollar los controladores difusos, teniendo en cuenta la cantidad de entradas y salidas de los procesos, la asignación de funciones de pertenencia y las técnicas de fusificación y defusificación. También utilizamos las mismas herramientas LabVIEW para continuar con el diseño del controlador PID.

Finalmente se implementa en un VI (archivo extensión de LabVIEW) el controlador con la planta el controlador y un HMI para validación y pruebas de los controladores.

La finalidad de este proyecto no solo es mejorar la eficiencia y eficacia de los controladores de procesos industriales, sino también evidenciar y demostrar la factibilidad de migración de un control tradicional (PID) a un control inteligente (Lógica difusa). Para lo cual se ha identificado que uno de los limitantes de los controladores PID es el tiempo de respuesta y no es robusto frente a perturbaciones propias de un sistema complejo.

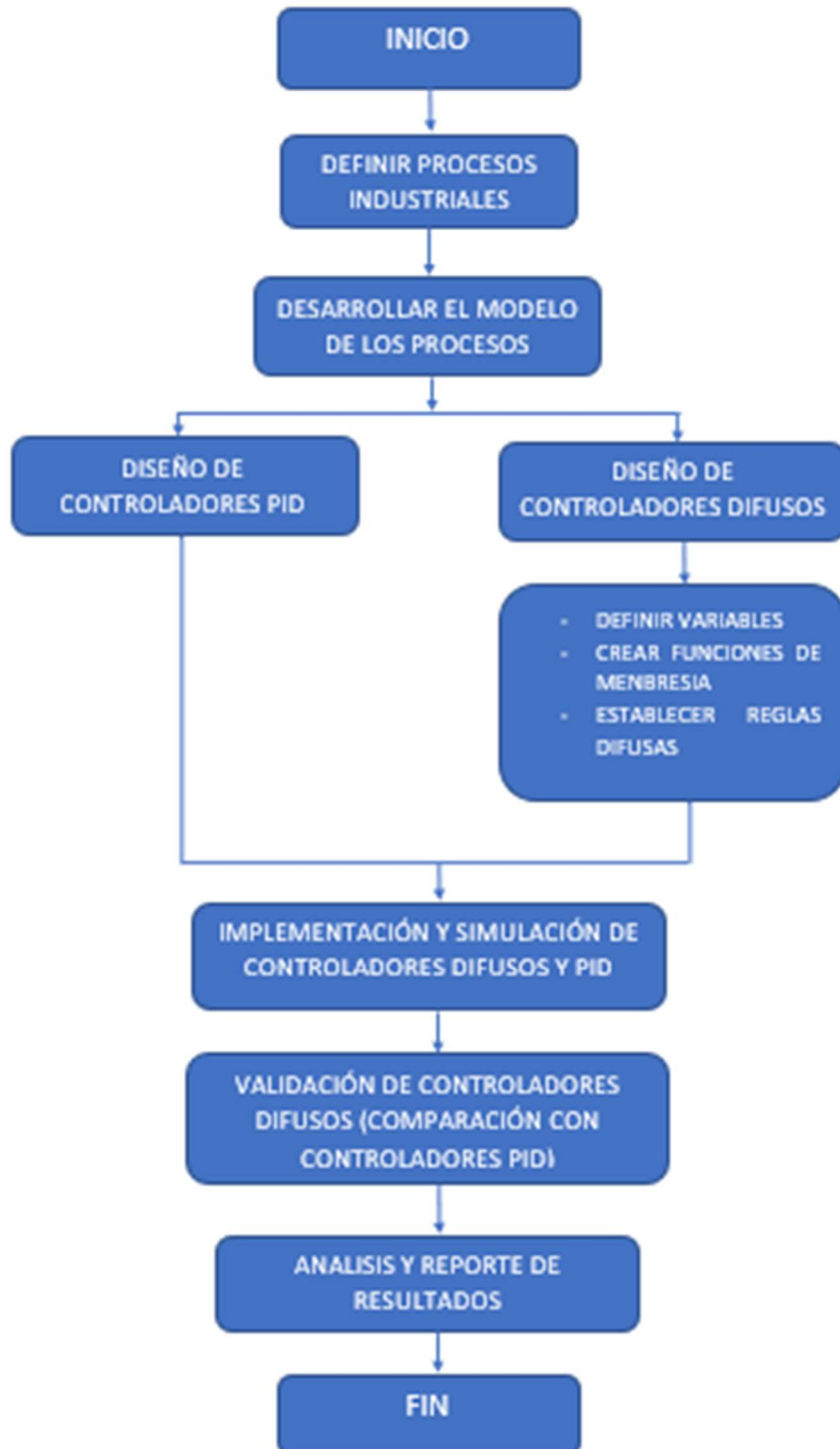
Bajo este contexto, la implementación de un controlador de inteligencia artificial mediante el diseño de un algoritmo de lógica difusa permitirá el control de plantas de prueba industrial más eficiente y eficaz, ya que permitirá bajar tiempos de respuesta, el sobre impulso, serán más precisos y robustos frente a perturbaciones.

**a. Estructura general**

A continuación se detalla la propuesta y estructura del proyecto:

**Figura 7.**

*Esquema general del proyecto*



Fuente: Elaboración propia, 2024

## **b. Explicación del aporte**

Se diseña e implementa dos controladores de lógica difusa de presión y flujo para las plantas de pruebas para posteriormente ser comparadas con controladores PID

En este proyecto de investigación se emplea un HMI para interactuar el operador con el proceso y control diseñado, gracias a esta interface el operador puede controlar, monitorear, observar las diferentes variables y magnitudes de los procesos, adicionalmente se podrá analizar gráficamente las tendencias de control como sobre impulso, tiempo de estabilización, perturbaciones, así podemos identificar las ventajas y desventajas de implementar un controlador de lógica difusa frente a un controlador PID

Para la obtención del modelo matemático de las plantas se usaron recursos tecnológicos, inicialmente se creó una base de datos extraída de las plantas de prueba, se ingresó un valor de entrada a la planta y se obtiene un valor a la salida, posteriormente usando la herramienta Matlab Ident se obtiene el modelo matemático. Para el diseño de controladores debido a la simplicidad de programación y a la capacidad de comunicación entre dispositivos de control y dispositivos industriales (transmisores y actuadores de la planta de prueba) usamos el software LabVIEW específicamente el toolbox Control Desing y Fuzzy Logic Controller.

En este proyecto de investigación se evaluarán las tendencias de cada controlador de lógica difusa con respecto a los controladores PID de forma gráfica, específicamente en tiempos de estabilización, sobre impulso, y verificación de qué tan estable es la acción de control. Se realiza la validación de cómo responde frente a perturbaciones.

El desarrollo y la simulación de controladores difusos proporcionan una herramienta importante para optimizar la gestión y el control en las plantas industriales. Estos controladores ofrecen una solución eficaz para lidiar con sistemas complejos y no lineales, brindando flexibilidad y capacidad de adaptación a condiciones variables. Además, la simulación antes de la implementación facilita una optimización precisa y ayuda a reducir los costos operativos, convirtiendo esta técnica en una alternativa valiosa en la ingeniería de control contemporánea.

### c. Estrategias y/o técnicas

#### Fundamentos matemáticos

Para el diseño de un controlador difuso hay que primeramente definir el tipo de sistema difuso que se va a aplicar, para este caso tanto en proceso de presión como en el de flujo usarán sistemas MISO (Múltiples entradas y una salida), a continuación, se definen las variables:

Para ambos procesos se definen como variables de entrada el error (e) y la derivada del error (de), para la variable de salida se define salida.

Representación matemática de las variables de entrada y salida

Matemáticamente las entradas y salidas de nuestro sistema están representadas de la siguiente manera.

#### Variable Error

Tomaremos como ejemplo el proceso de presión el mismo que tiene un rango de medición entre 10 a 50 (PSI), bajo esta condición diseñamos la variable error entre los intervalos (-50 a 50). Se definen para esta variable 5 funciones de membresía. A continuación, detallamos cada una:

**1.- NG** (Negativo Grande), esta función será de tipo trapezoidal y están definida dentro de los intervalos (-50, -50, -40, -20), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 8.

Figura 8.

*Representación matemática de la función de pertenencia NG de la entrada "error"*

$$\mu_{NG}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -50 \\ \frac{x - (-50)}{-40 - (-50)} & \text{si } -50 < x \leq -40 \\ \frac{-20 - x}{-20 - (-40)} & \text{si } -40 < x < -20 \\ 0 & \text{si } x \geq -20 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**2.- NP** (Negativo Pequeño), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-40, -20, 0), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 9.

**Figura 9.**

*Representación matemática de la función de pertenencia NP de la entrada "error"*

$$\mu_{NP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -40 \text{ o } x \geq 0 \\ \frac{x+40}{20} & \text{si } -40 < x \leq -20 \\ \frac{0-x}{20} & \text{si } -20 < x < 0 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**3.- Z** (Cero), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-20, 0, 20), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 10.

**Figura 10.**

*Representación matemática de la función de pertenencia Z de la entrada "error"*

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -20 \text{ o } x \geq 20 \\ \frac{x+20}{20} & \text{si } -20 < x \leq 0 \\ \frac{20-x}{20} & \text{si } 0 < x \leq 20 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**4.- PP** (Positivo Pequeño), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (0, 20, 40), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 11.

**Figura 11.**

*Representación matemática de la función de pertenencia PP de la entrada "error"*

$$\mu_{PP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \text{ o } x \geq 40 \\ \frac{x}{20} & \text{si } 0 < x \leq 20 \\ \frac{40-x}{20} & \text{si } 20 < x < 40 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

5.- **PG** (Positivo Grande), esta función será de tipo trapezoidal y está definida dentro de los intervalos (20, 40, 50, 50), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 12.

Figura 12.

*Representación matemática de la función de pertenencia PG de la entrada "error"*

$$\mu_{PG}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 20 \\ \frac{x-20}{40-20} & \text{si } 20 < x \leq 40 \\ \frac{50-x}{50-40} & \text{si } 40 < x < 50 \\ 1 & \text{si } x \geq 50 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Variable derivada del error:**

Para la variable "derivada del error" igualmente tomamos los mismos parámetros es decir intervalo de (-50 a 50), y 5 funciones de pertenencia similares a la entrada "error", así:

1.- **NG** (Negativo Grande), esta función será de tipo trapezoidal y está definida dentro de los intervalos (-50, -50, -40, -20), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 13.

Figura 13.

*Representación matemática de la función de pertenencia NG de la entrada "derivada del error"*

$$\mu_{NG}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -50 \\ \frac{x-(-50)}{-40-(-50)} & \text{si } -50 < x \leq -40 \\ \frac{-20-x}{-20-(-40)} & \text{si } -40 < x < -20 \\ 0 & \text{si } x \geq -20 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024



2.- **NP** (Negativo Pequeño), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-40, -20, 0), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 14.

Figura 14.

*Representación matemática de la función de pertenencia NP de la entrada “derivada del error”*

$$\mu_{NP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -40 \text{ o } x \geq 0 \\ \frac{x+40}{20} & \text{si } -40 < x \leq -20 \\ \frac{0-x}{20} & \text{si } -20 < x < 0 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.- **Z** (Cero), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-20, 0, 20), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 15.

Figura 15.

*Representación matemática de la función de pertenencia Z de la entrada “derivada del error”*

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -20 \text{ o } x \geq 20 \\ \frac{x+20}{20} & \text{si } -20 < x \leq 0 \\ \frac{20-x}{20} & \text{si } 0 < x \leq 20 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

4.- **PP** (Positivo Pequeño), esta función es de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (0, 20, 40), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 16.

Figura 16.

*Representación matemática de la función de pertenencia PP de la entrada “derivada del error”*

$$\mu_{PP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \text{ o } x \geq 40 \\ \frac{x}{20} & \text{si } 0 < x \leq 20 \\ \frac{40-x}{20} & \text{si } 20 < x < 40 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

5.- **PG** (Positivo Grande), esta función será de tipo trapezoidal y está definida dentro de los intervalos (20, 40, 50, 50), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 17.

Figura 17.

*Representación matemática de la función de pertenencia PG de la entrada "derivada del error"*

$$\mu_{PG}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 20 \\ \frac{x-20}{40-20} & \text{si } 20 < x \leq 40 \\ \frac{50-x}{50-40} & \text{si } 40 < x < 50 \\ 1 & \text{si } x \geq 50 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Variable Salida:**

Para la variable de salida se tomará en cuenta un intervalo de entre (-1 a 1), y se usará 7 funciones de membresía a continuación se detalla cada una de ellas.

1.- **NG** (Negativo grande), esta función será de tipo trapezoidal y está definida dentro de los intervalos (-1, -1, -0.9, -0.6), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 18.

Figura 18.

*Representación matemática de la función de pertenencia NG de la salida*

$$\mu_{NG}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -1 \\ \frac{x-(-1)}{-0.9-(-1)} & \text{si } -1 < x \leq -0.9 \\ \frac{-0.6-x}{-0.6-(-0.9)} & \text{si } -0.9 < x < -0.6 \\ 0 & \text{si } x \geq -0.6 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**2.- NM** (Negativo medio), esta función será de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-0.9, -0.6, -0.3), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 19.

**Figura 19.**

*Representación matemática de la función de pertenencia NM de la salida*

$$\mu_{NM}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -0.9 \text{ o } x \geq -0.3 \\ \frac{x+0.9}{0.3} & \text{si } -0.9 < x \leq -0.6 \\ \frac{-0.3-x}{0.3} & \text{si } -0.6 < x \leq -0.3 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**3.- NP** (Negativo pequeño), esta función será de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-0.6, -0.3, 0), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 20.

**Figura 20.**

*Representación matemática de la función de pertenencia NP de la salida*

$$\mu_{NP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -0.6 \text{ o } x \geq 0 \\ \frac{x+0.6}{0.3} & \text{si } -0.6 < x \leq -0.3 \\ \frac{0-x}{0.3} & \text{si } -0.3 < x < 0 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

**4.- Z(Cero)**, esta función será de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (-0.3, 0, 0.3), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 21.

**Figura 21.**

*Representación matemática de la función de pertenencia Z de la salida*

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -0.3 \text{ o } x \geq 0.3 \\ \frac{x+0.3}{0.3} & \text{si } -0.3 < x \leq 0 \\ \frac{0.3-x}{0.3} & \text{si } 0 < x \leq 0.3 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

5.- **PP** (Positivo pequeño), esta función será de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (0, 0.3, 0.6), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 22.

Figura 22.

*Representación matemática de la función de pertenencia PP de la salida*

$$\mu_{PP}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \text{ o } x \geq 0.6 \\ \frac{x}{0.3} & \text{si } 0 < x \leq 0.3 \\ \frac{0.6-x}{0.3} & \text{si } 0.3 < x \leq 0.6 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

6.- **PM** (Positivo medio), esta función será de tipo triangular y está definida dentro de los intervalos (0.3, 0.6, 0.9), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 23.

Figura 23.

*Representación matemática de la función de pertenencia PM de la salida*

$$\mu_{PM}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0.3 \text{ o } x \geq 0.9 \\ \frac{x-0.3}{0.3} & \text{si } 0.3 < x \leq 0.6 \\ \frac{0.9-x}{0.3} & \text{si } 0.6 < x \leq 0.9 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

7.- **PG** (Positivo grande), esta función será de tipo trapezoidal y está definida dentro de los intervalos (0.6, 0.9, 1, 1), matemáticamente está representada por la ecuación de la Figura 24.

Figura 24.

*Representación matemática de la función de pertenencia PG de la salida*

$$\mu_{PG}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0.6 \\ \frac{x-0.6}{0.9-0.6} & \text{si } 0.6 < x \leq 0.9 \\ \frac{1-x}{1-0.9} & \text{si } 0.9 < x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

## La FAM (Matriz de Reglas Difusas)

Para crear una Matriz de Reglas Difusas (FAM, por sus siglas en inglés) que relacione las variables "error", "derror" y "salida", se pueden usar reglas lógicas que asocian combinaciones de "error" y "derror" con una salida deseada.

Las reglas difusas se pueden expresar en términos de funciones de pertenencia. En un sistema de inferencia difusa, cada regla de la FAM tiene la forma:

*Si  $E$  es  $A$  y  $dE$  es  $B$ , entonces  $S$  es  $C$*

Donde:

- $E$ , es la variable error
- $dE$ , es la variable derivada del error
- $S$ , es la variable salida
- $A$  y  $B$  son conjuntos difusos para las variables "error" y "derror".
- $C$  es un conjunto difuso para la variable "salida".

### Ejemplo de Reglas

- Si  $Error$  es  $NG$  y  $dError$  es  $NG$ , entonces  $Salida$  es  $NG$ .  
Si  $\mu_{NG}(E)$  y  $\mu_{NG}(dE)$ , entonces  $\mu_{NG}(S)$
- Si  $Error$  es  $NG$  y  $dError$  es  $NP$ , entonces  $Salida$  es  $NG$ .  
Si  $\mu_{NG}(E)$  y  $\mu_{NP}(dE)$ , entonces  $\mu_{NG}(S)$
- Si  $Error$  es  $Z$  y  $dError$  es  $Z$ , entonces  $Salida$  es  $Z$ .  
Si  $\mu_Z(E)$  y  $\mu_Z(dE)$ , entonces  $\mu_Z(S)$

La FAM se organiza típicamente en una tabla de decisión donde las filas corresponden a las diferentes posibles combinaciones de "error" y las columnas corresponden a las combinaciones de "derror", con las celdas llenas de las respectivas salidas.

**Tabla 2.**

*FAM (relación error, derror y salida)*

<b>E/dE</b>	<b>dE = NG</b>	<b>dE = NP</b>	<b>dE = Z</b>	<b>dE = PP</b>	<b>dE = PG</b>
E = NG	S = NG	S = NG	S = NM	S = NP	S = Z
E = NP	S = NG	S = NM	S = NP	S = Z	S = PP
E = Z	S = NM	S = NP	S = Z	S = PP	S = PM
E = PP	S = NP	S = Z	S = PP	S = PM	S = PG
E = PG	S = Z	S = PP	S = PM	S = PG	S = PG

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Ejemplo Práctico:**

A partir de las variables creadas y sus respectivas funciones de membresía en un sistema difuso tenemos, la variable error=40 y derror=30, se requiere conocer la salida del sistema difuso.

**1.- Evaluar la Membresía de las Variables**

Se evalúa, los datos ingresados en cada función de membresía.

**Evaluación de  $\mu_E(40)$**

- Negativo Grande (NG):

$$\mu_{NG}(40) = 0 \text{ (porque } 40 > -20\text{)}$$

- Negativo Pequeño (NP):

$$\mu_{NP}(40) = 0 \text{ (porque } 40 \geq 0\text{)}$$

- Cero (Z):

$$\mu_Z(40) = 0 \text{ (porque } 40 > 20\text{)}$$

- Positivo Pequeño (PP):

$$\mu_{PP}(40) = \frac{40 - 20}{20} = 1 \text{ (porque } 20 \leq 40 \leq 40)$$

- Positivo Grande (PG):

$$\mu_{PG}(40) = \frac{40 - 20}{20} = 1 \text{ (porque } 20 \leq 40 \leq 40)$$

### **Evaluación de $\mu_{dE}$ (30)**

- Negativo Grande (NG):

$$\mu_{NG}(30) = 0 \text{ (porque } 30 > -20)$$

- Negativo Pequeño (NP):

$$\mu_{NP}(30) = 0 \text{ (porque } 30 \geq 0)$$

- Cero (Z):

$$\mu_Z(30) = 0 \text{ (porque } 30 > 20)$$

- Positivo Pequeño (PP):

$$\mu_{PP}(30) = \frac{30 - 0}{20} = 1.5 \text{ (porque } 0 \leq 30 \leq 40 \text{ y se limita a 1)}$$

- Positivo Grande (PG):

$$\mu_{PG}(30) = \frac{30 - 20}{20} = 0.5 \text{ (porque } 20 \leq 30 \leq 40)$$

## 2.- Aplicar las Reglas Difusas

Usamos las reglas difusas para determinar la salida. Considerando nuestras reglas:

Si  $E$  es PP y  $dE$  es PG, entonces  $S$  es PP.

Evaluando:

$$\mu_{PP}(40) = 1$$

$$\mu_{PG}(30) = 0.5$$

La salida  $S$  será influenciada principalmente por el conjunto difuso correspondiente a PP. La combinación de las membresías se hace a través de la operación de mínimo entre las funciones de pertenencia de  $E$  y  $dE$ .

$$\text{Grado de pertenencia a } PP = \min(\mu_{PP}(40), \mu_{PG}(30)) = \min(1, 0.5)$$

## 3.- Defusificación

Para obtener el valor crisp de la salida, se usa la defusificación. Si usamos el método del centro de gravedad (centroide), calculamos el valor de salida como un promedio ponderado basado en los grados de pertenencia. En este caso:

Conjunto de salida relevante (PP) tiene una pertenencia de 0.5.

**Valor crisp de salida = Media ponderada sobre el rango de salida**

Dado que la salida es PP, el centroide de PP puede aproximarse al valor central del intervalo  $[0,0.6]$ . Así que:

$$\text{Centroide de PP} = (0+0.6) / 2 = 0.3$$

Ajustado por el grado de pertenencia:

$$\text{Valor crisp de salida} = 0.3 \times 0.5 = 0.15$$



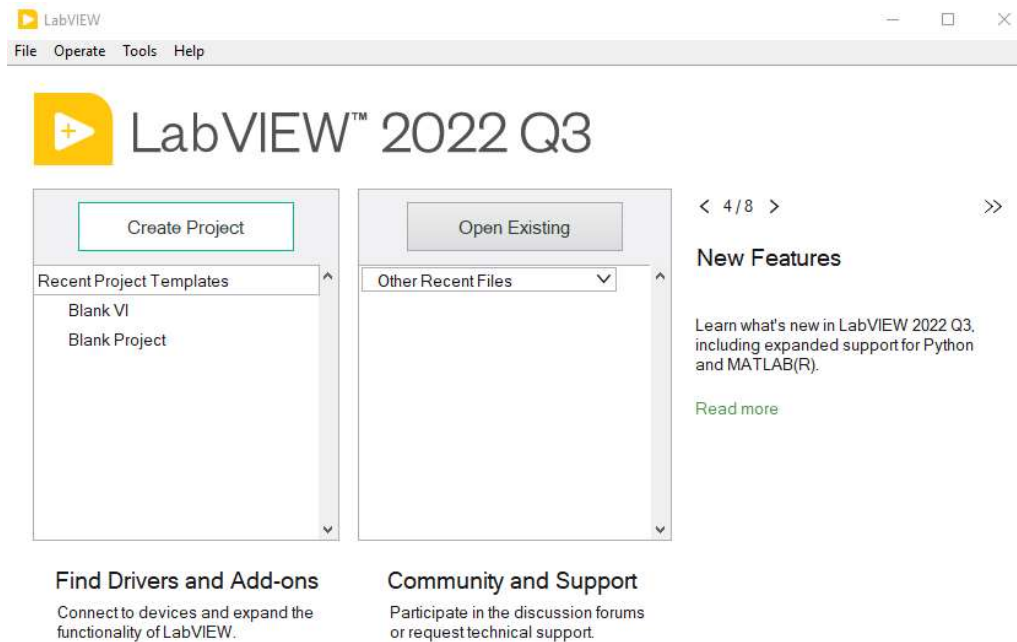
## Diseño del controlador

Las principales herramientas usadas son los softwares de modelamiento (MATLAB) como el software de diseño y simulación del controlador (LABVIEW), en cuestión de hardware se usó una FPGA para la toma de datos de entrada y salida de las plantas a prueba para el posterior procesamiento de datos y modelamiento.

Para el diseño y simulación del controlador se empezó generando un proyecto en LabVIEW como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25.**

*Creación de proyecto en LabVIEW*

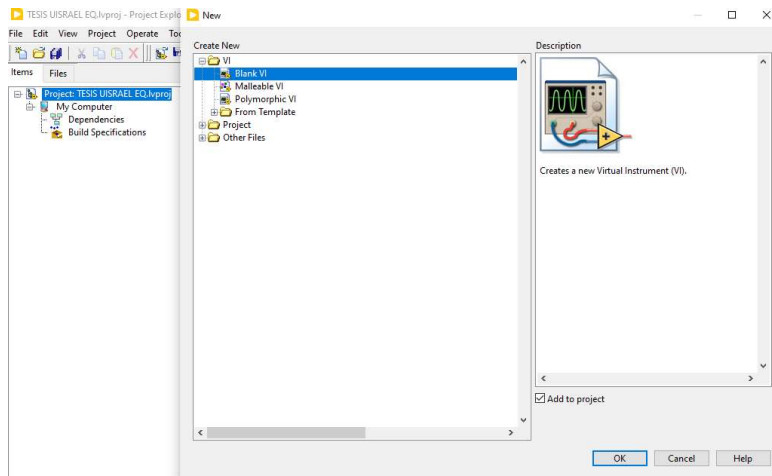


Fuente: Elaboración propia, 2024

Una vez generado el proyecto se crea un nuevo VI (entorno de programación), en nuestro caso se generará dos VI's en los cuales se generará tanto los controladores de Presión como de Flujo.

**Figura 26.**

*Generación de un nuevo VI para programación*



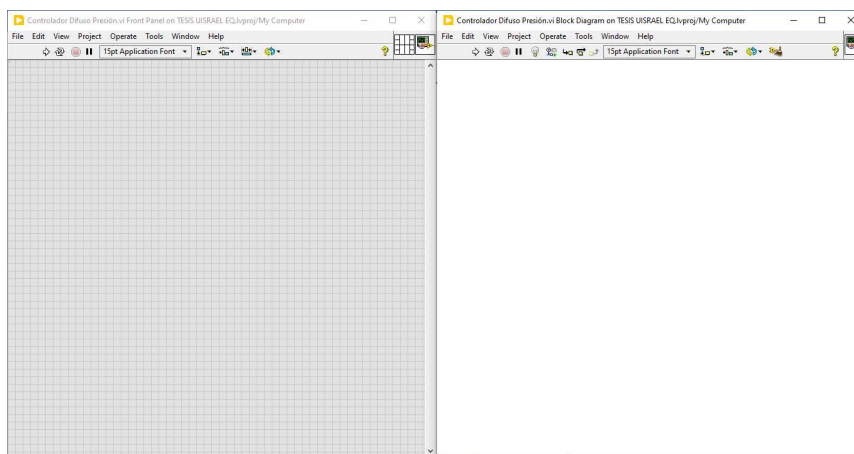
Fuente: Elaboración propia, 2024

Al generarse un nuevo VI podemos empezar a trabajar tanto en el panel frontal que es la interfaz de usuario del VI y el diagrama de bloques que contiene el código fuente gráfico del programa LabVIEW.

En el panel frontal diseñaremos un HMI donde podemos controlar y observar cómo funciona nuestros controladores, en el diagrama de bloques trabajaremos específicamente en el diseño de los controladores y la simulación de estos.

**Figura 27.**

*Panel Frontal y Diagrama de bloques del VI.*



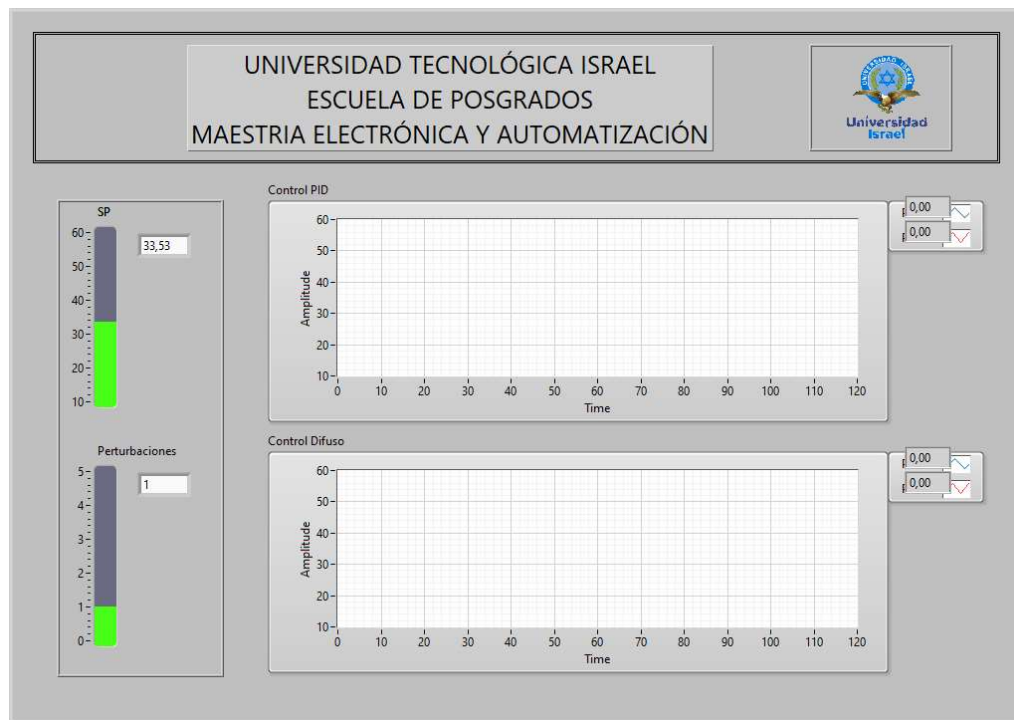
Fuente: Elaboración propia, 2024

## Diseño de HMI (Interfaz humano - máquina)

En el panel frontal diseñamos el HMI el cual consta de un controlador en el que cambiaremos el Set Point (SP), también constará de un indicador gráfico donde se visualiza las variables del sistema controlado como son: el set point (SP) y la variable del proceso (PV), se incluye un apartado de la acción de control o variable manipulada (MV) para ver el funcionamiento del actuador.

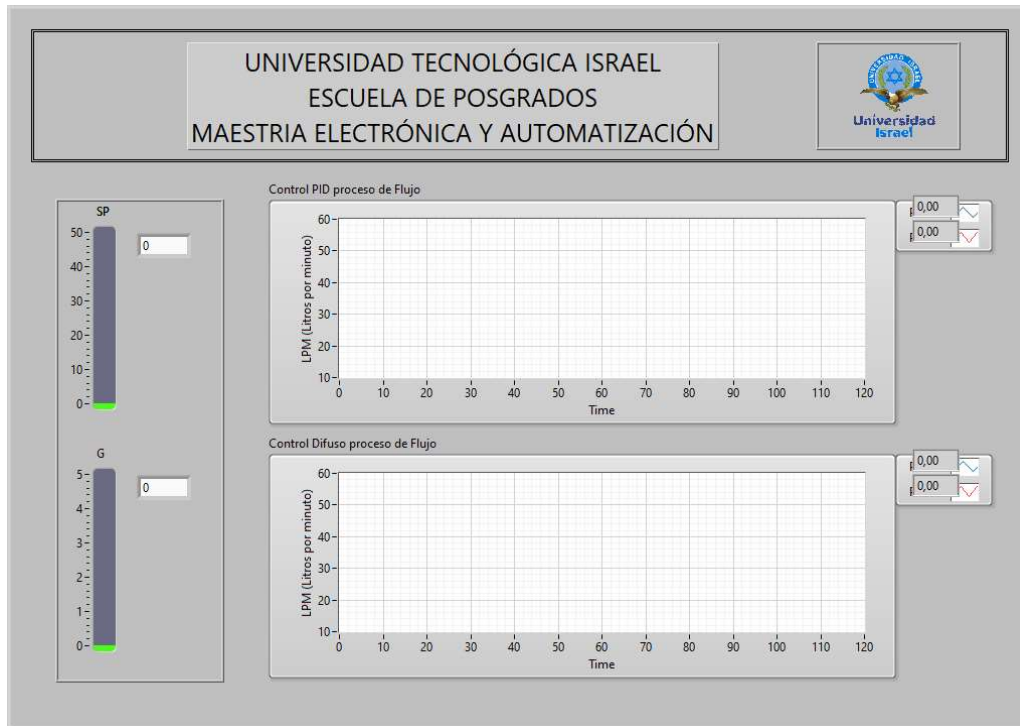
**Figura 28.**

*HMI para planta de presión*



Fuente: Elaboración propia, 2024

**Figura 29.**  
*HMI para el proceso de flujo*



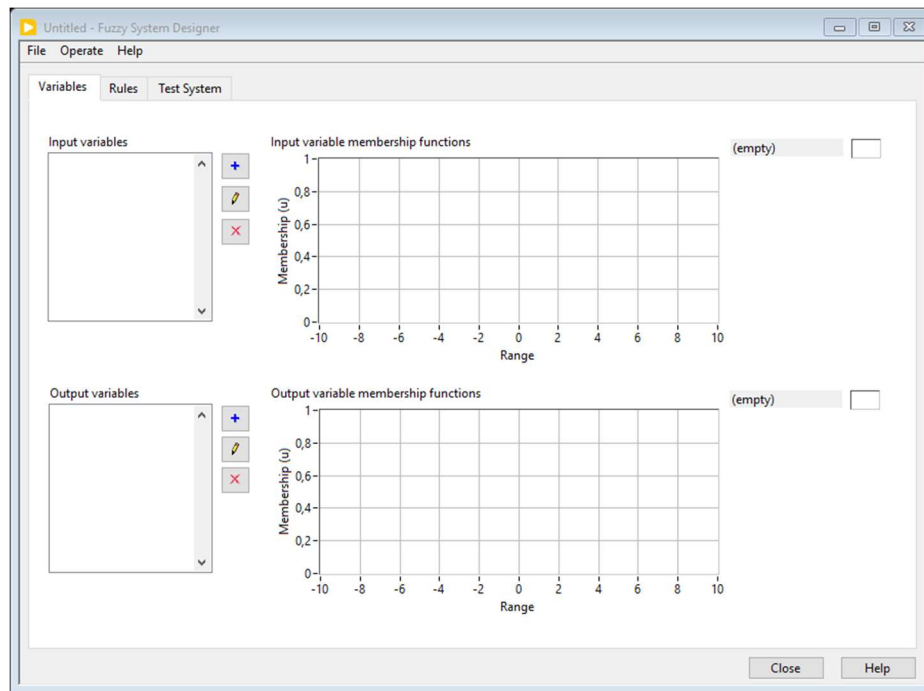
Fuente: Elaboración propia, 2024

## Diseño de controladores

Para el diseño del controlador difuso se usa la herramienta del LabVIEW Fuzzy System Designer, la misma que permite el diseño del controlador gráfica e interactivamente, desde la creación de variables hasta la defusificación.

**Figura 30.**

*Interfaz Fuzzy System Designer.*



Fuente: Elaboración propia, 2024

### Creación de variables y de funciones de membresía

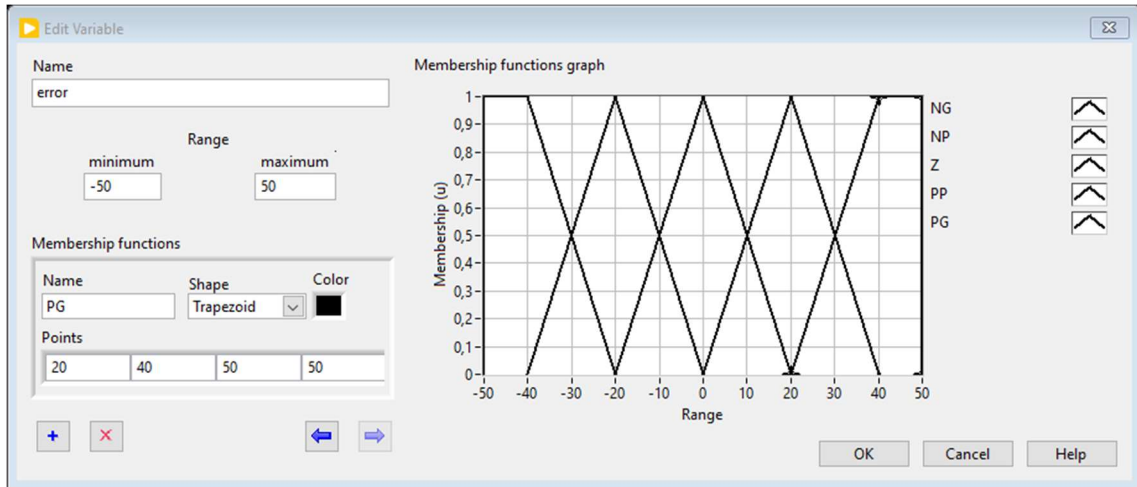
Se definen las entradas de los procesos de presión y flujo que serán el error y la derivada del error, y una salida que será la misma del sistema, ambos procesos contarán con las mismas entradas y salidas, los sistemas de nuestros controladores serán tipo MISO (Múltiples entradas, una salida)

Las funciones de membresía se las diseña acorde a proceso y el rango de medición en los procesos es así como para el proceso de presión se tomará el rango de (-50 a 50), y en el proceso de flujo de (-45 a 45), para las salidas en ambos casos el rango será de (-1 a 1).

A continuación, se procede a la creación de la entrada error (e) y creación de sus funciones de membresía ("NG", "NP", "Z", "PP", "PG"), las misma que quedarán de la siguiente manera.

**Figura 31.**

*Creación variable error y su función de membresía*

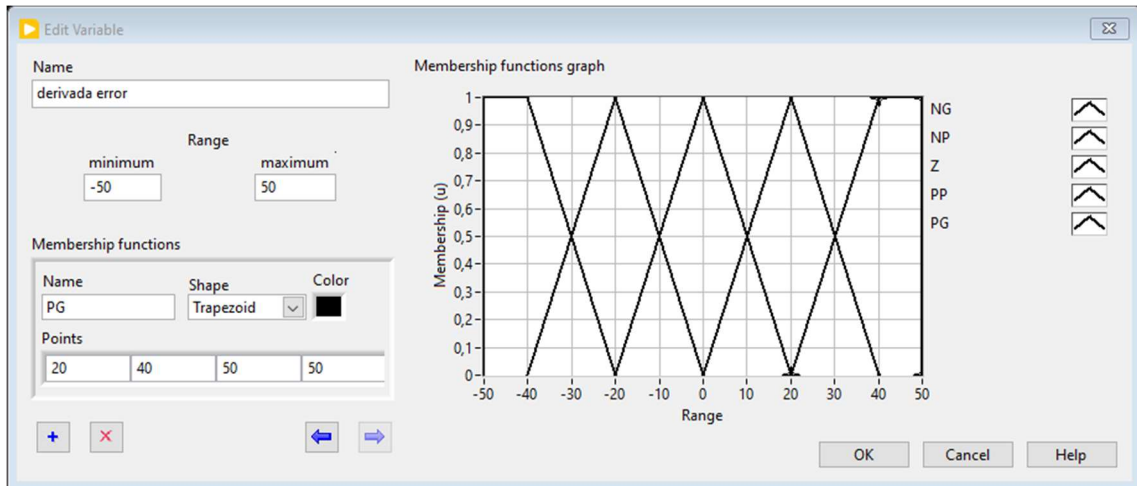


Fuente: Elaboración propia, 2024

De la misma manera, se procede a la creación de la entrada derivada del error (de) y creación de sus funciones de membresía (“NG”, “NP”, “Z”, “PP”, “PG”), las misma que quedarán de la siguiente manera.

**Figura 32.**

*Creación variable derivada del error y su función de membresía*

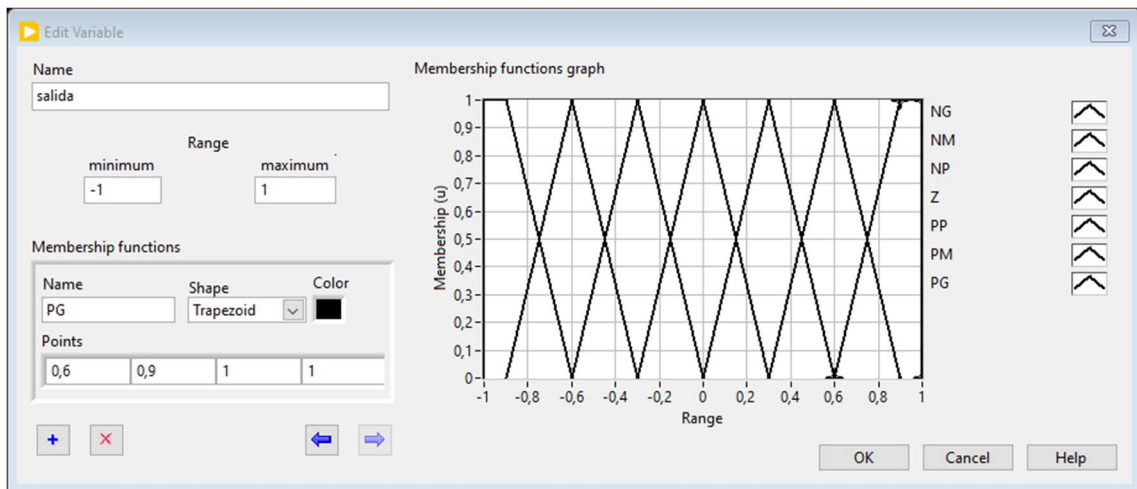


Fuente: Elaboración propia, 2024

Posteriormente se genera la salida del sistema se asigna igualmente las respectivas funciones de membresía como se muestra en el gráfico.

Figura 33.

Creación variable salida del sistema y su función de membresía



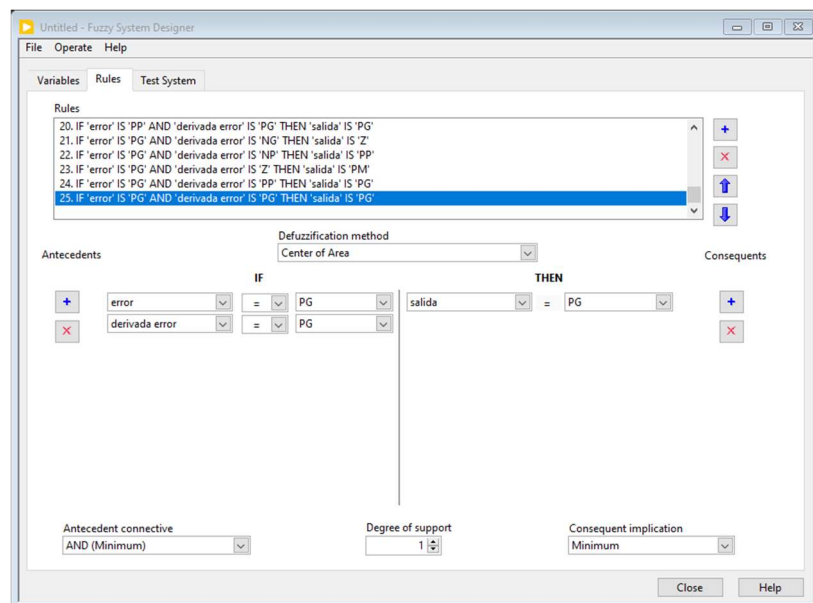
Fuente: Elaboración propia, 2024

### Generación de reglas

En la interfaz acorde a las entradas y salidas propuestas se genera una relación entre ellas, esta relación puede hacerse a través de la FAM anteriormente expuesta en una tabla y posteriormente crear las reglas en el interfaz para este caso se generan 25 reglas.

Figura 34.

Creación de reglas difusas para los sistemas de flujo y presión

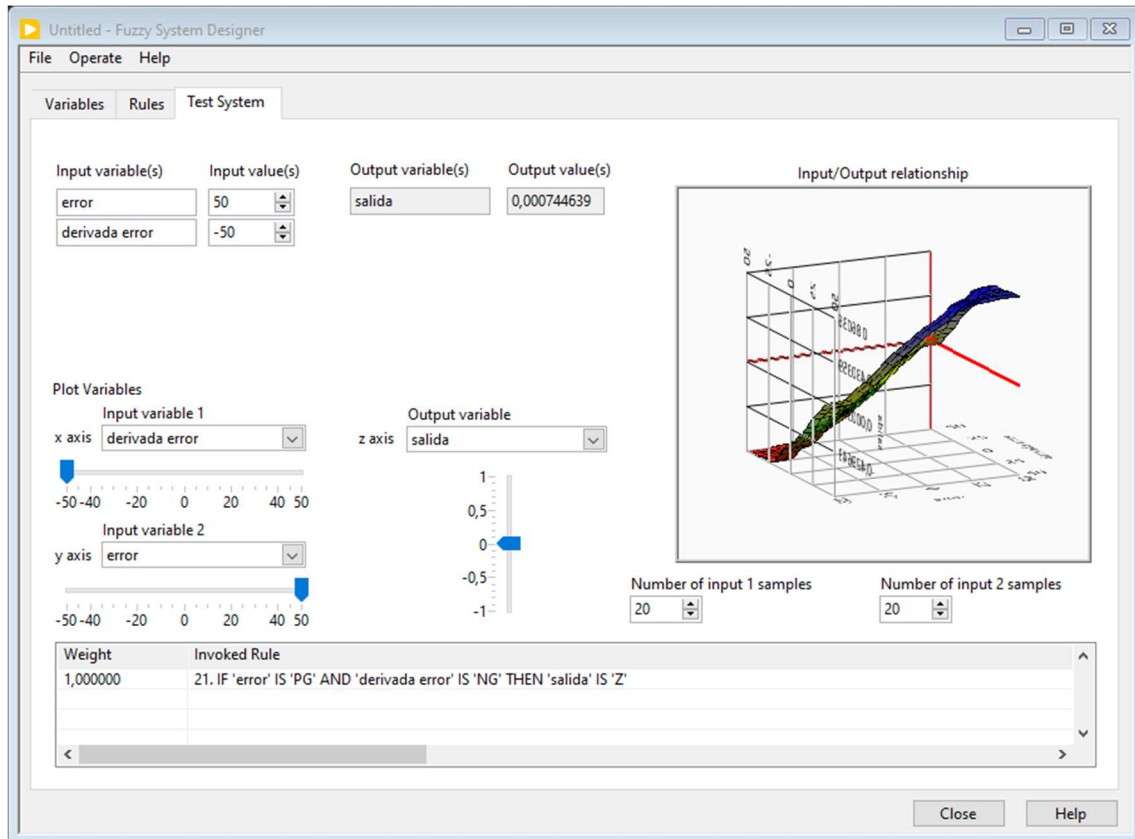


Fuente: Elaboración propia, 2024

Esta herramienta de diseño nos permite igualmente validar los puntos de prueba e incluso gráficamente para comprobar el funcionamiento del controlador, como se muestra a continuación.

**Figura 35.**

*Testeo de Controlador difuso*



Fuente: Elaboración propia, 2024

### Implementación de los controladores para el proceso de presión

Para la implementación de los controles de requiere realizar la programación en el Diagrama de bloques, en este apartado se implementará el controlador difuso en paralelo con el controlador PID.

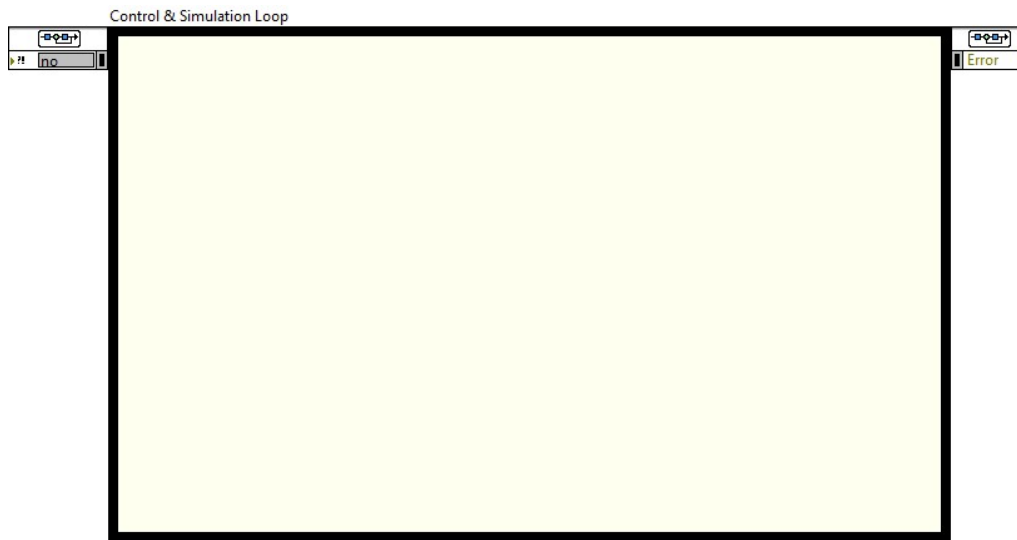
A continuación, se detalla el procedimiento para la implementación:

Como primer punto necesitamos una estructura que permita realizar simulaciones de control para lo cual se utilizará la estructura Control & Simulation Loop, dentro de esta estructura se realizará la programación y simulación de los controladores.



Figura 36.

*Estructura Control & Simulation Loop*

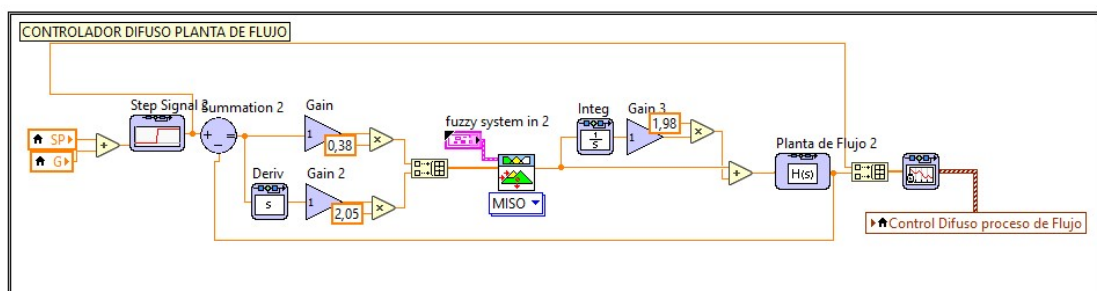


Fuente: Elaboración propia, 2024

Para la implementación del controlador difuso creamos un diagrama de proceso en la estructura "Control & Simulation Loop", el cual contará de dos controladores como son el SET POINT (SP), y un segundo controlador que servirá para añadir perturbaciones (G), posteriormente a la entrada del controlador difuso tendremos dos variables de entrada que son, el error y la derivada del error, a estas entradas se les añade una ganancia a fin de mejorar la respuesta del controlador, a la salida del controlador difuso añadimos una acción integral que permite estabilizar la salida del controlador, a continuación aplicamos esta acción de control al proceso (Presión / Flujo) y finalmente se gráfica las tendencias set point (SP) y la variable del proceso (PV).

Figura 37.

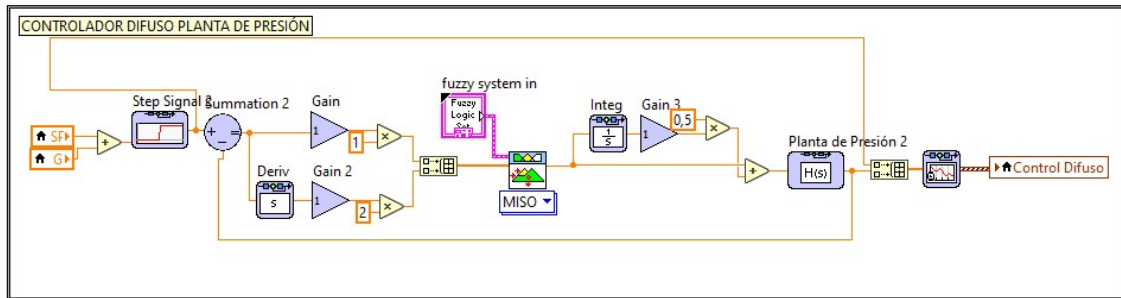
*Controlador difuso del proceso de flujo*



Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 38.

Controlador difuso del proceso de presión

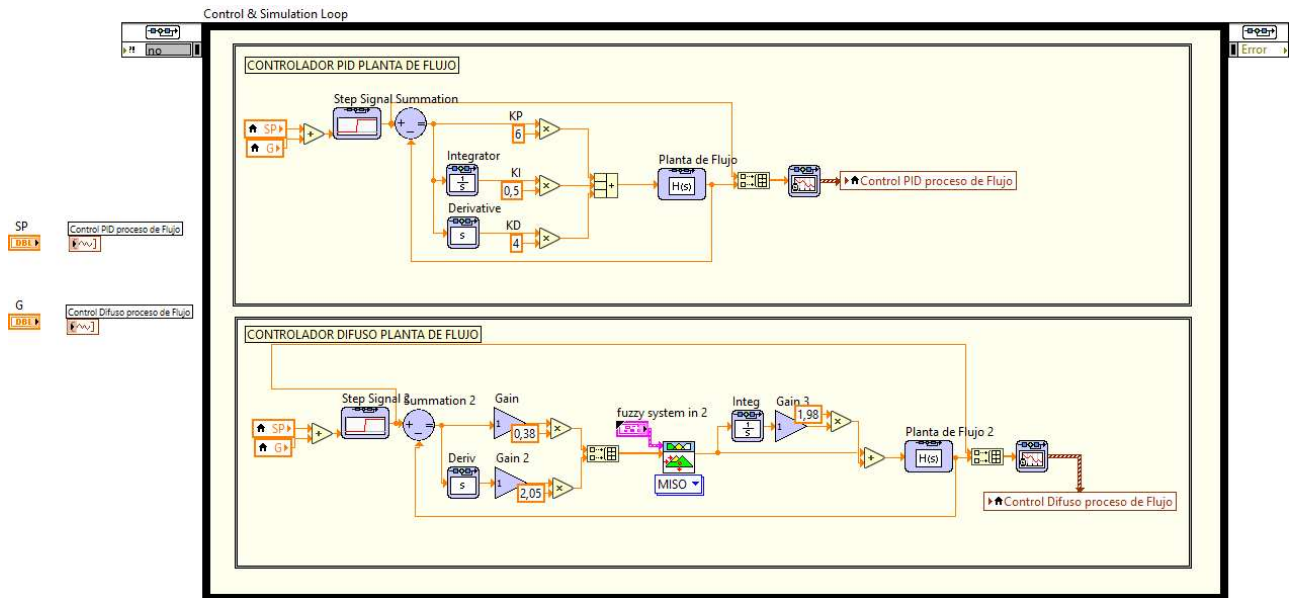


Fuente: Elaboración propia, 2024

De la misma manera, se crea los controladores con la herramienta control Design, en donde gráficamente se implementa el control PID el mismo que es ajustado o sintonizado por el método de tanteo, simultáneamente se procede a implementar el controlador difuso como se muestra en la figura.

Figura 39.

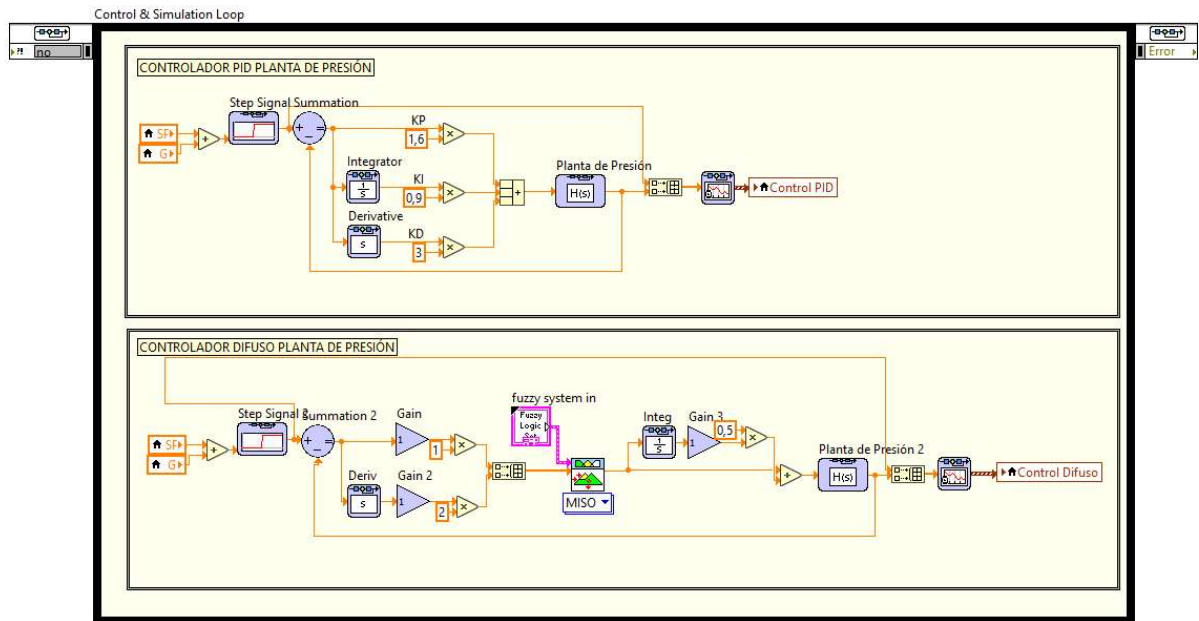
Controladores PID y Difuso de la planta de flujo



Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 40.

Controladores PID y Difuso de la planta de presión



Fuente: Elaboración propia, 2024

### 2.3 Validación de la propuesta

Para validar correctamente la propuesta, se han considerado perfiles que cumplan con los criterios establecidos, incluyendo la formación y la experiencia laboral de los especialistas.

Datos del validadores.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
JAVIER FERNANDO CULQUI TIPÁN	6	MAGISTER EN ELECTRICIDAD MENCIÓN EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	Docente Investigador de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE
LUIS ROLANDO CRUZ PANCHI	10	MAGISTER EN ELECTRICIDAD MENCIÓN EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	Docente en la facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi
WILMER QUIMBITA ZAPATA	5	MAGISTER EN ELECTRONICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES	Docente

Msc. Javier Culqui

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto				X	
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad				X	
Pertinencia					X

Msc. Luis Cruz

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

Msc. Wilmer Quimbita

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

## 2.4 Matriz de articulación de la propuesta

En la presente matriz se sintetiza la articulación del producto realizado con los sustentos teóricos, metodológicos, estratégicos-técnicos y tecnológicos empleados.

**Tabla 3.**

*Matriz de articulación*

Ejes o partes principales del proyecto	Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon
<b>1</b> Análisis de los procesos a ser sometidos a pruebas (Plantas de presión y flujo), para modelado matemático	1.1. Para el modelamiento de plantas se tomó datos experimentales de entrada y salida, para luego ser procesados en Matlab y la obtención de la función de transferencia. 1.2. Tomas de decisiones en base al porcentaje de error y similitud del error del modelo matemático con respecto a la naturaleza real de los procesos.	Inteligencia Artificial Matemáticas Aplicadas Modelamiento en Software Matlab	Toolbox Ident de Matlab, fundamentos teóricos de obtención de modelos matemáticos
<b>2</b> Diseño Controlador de Lógica Difusa y Controladores PID	2.1. Para el diseño de controladores tradicionales PID, tomamos como referencia el método de sintonización por tanteo, se usa el software LabVIEW 2.2. Se crea un HMI para verificar dinámica y gráficamente el	Diseño de controladores con LabVIEW Diseño de HMI en panel frontal LabVIEW	Diseño de controlador difuso con toolbox de LabVIEW, diseño de controlador PID con LabVIEW

		<p>comportamiento de cada controlador</p> <p>2.3. El diseño de los controladores difusos se los hace mediante la herramienta interactiva Fuzzy Controller</p>		
<b>3</b>	Implementación y simulación de controladores difusos y controladores PID	<p>3.1. Se programa la simulación usando la función de transferencia obtenida, y se implementa en el diagrama de bloques del LabVIEW</p> <p>3.2. Para la verificación del funcionamiento del controlador se lo hace mediante las gráficas de tendencias en el HMI</p> <p>3.3. Los controladores son implementados en paralelo para verificar su funcionamiento y compararlos simultáneamente</p>	Fuzzy System Controller Control Design	<p>Fuzzy Designer se aplicó para la implementación de los controladores difusos.</p> <p>Control Design se usó para simular procesos y modelos matemáticos de plantas en tiempo real.</p>

## 2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.

Para realizar las pruebas es necesario tener en cuenta tanto el SP inicial como el final. Se examinan los resultados del proceso y, a partir de estos valores, se calcula el tiempo de estabilización entre el primer SP y el SP final. La estación de caudal y la estación de presión fueron los dos procedimientos en los que se realizaron estas pruebas.

La ecuación presentada en la Figura 41 se utilizó para examinar los datos de SP y PV con el fin de calcular el porcentaje de inexactitud en cada medición.

**Figura 41.**

*Ecuación porcentaje de error*

$$(\%) \text{ de Error} = \frac{\text{SP} - \text{PV}}{\text{SP}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia, 2024

### **Análisis de resultado de la implementación del controlador difuso en el proceso de presión.**

Basándose en los resultados de las pruebas realizadas y en el error observado entre el PV y el SP, los resultados de la Tabla 4 se ajustan a lo esperado porque el porcentaje de error es muy bajo.

**Tabla 4.**

*Resultados del Controlador Difuso del proceso de Presión.*

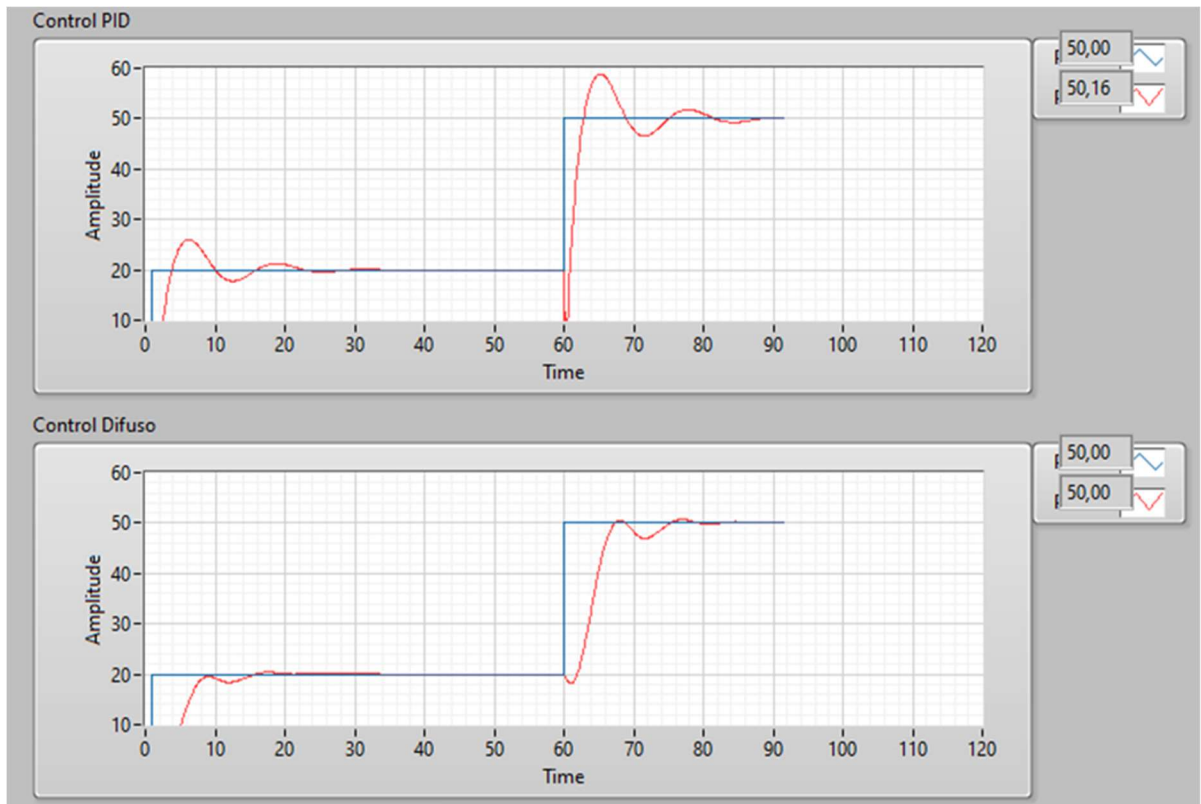
<b>SP INICIAL (PSI)</b>	<b>SP FINAL (PSI)</b>	<b>PV (PSI)</b>	<b>TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN (SEG)</b>	<b>% DE ERROR</b>
20	50	50	25	0
50	20	19,97	29	0,15
20	45	45,01	28	0,02
45	25	25	29	0
25	35	34,99	15	0,03

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 42, realizamos un cambio de SP de 20 (PSI) a 50 (PSI), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 42.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 50)*



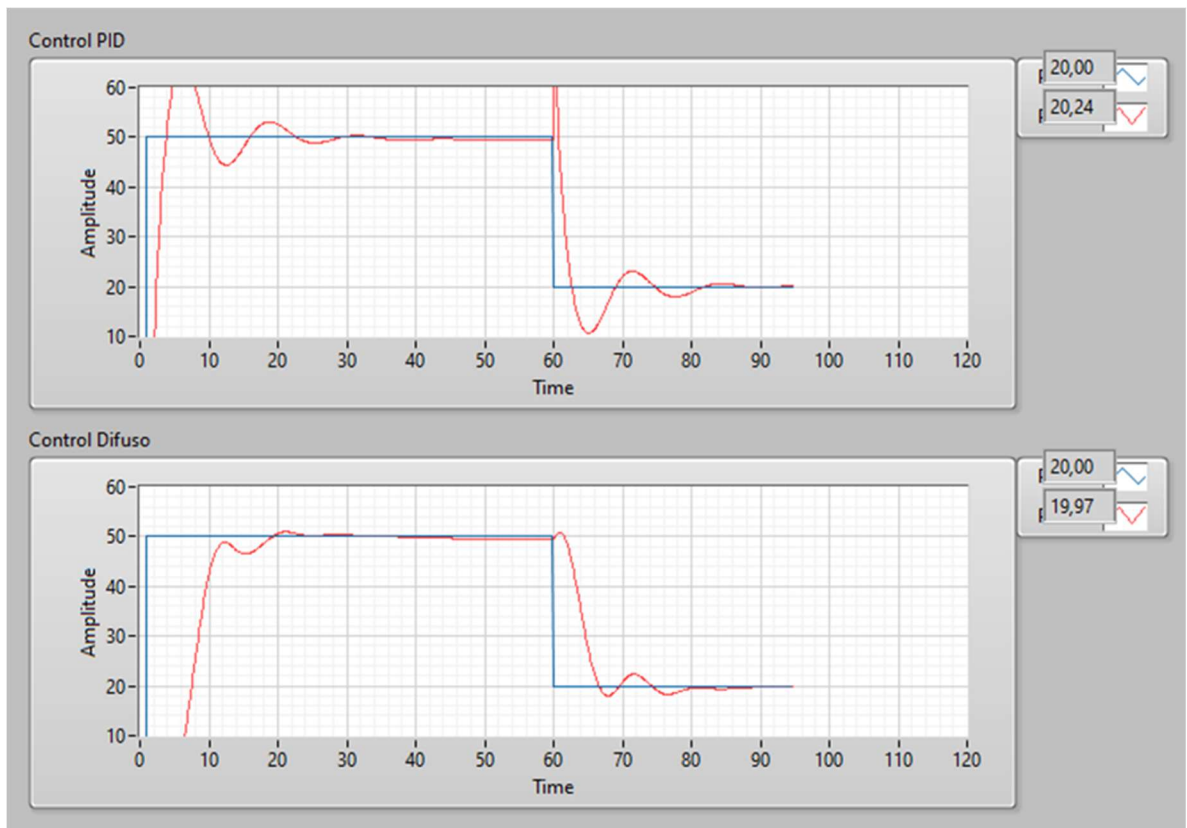
Fuente: Elaboración propia, 2024



En la Figura 43, realizamos un cambio de SP de 50 (PSI) a 20 (PSI), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.15%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 43.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 20)*

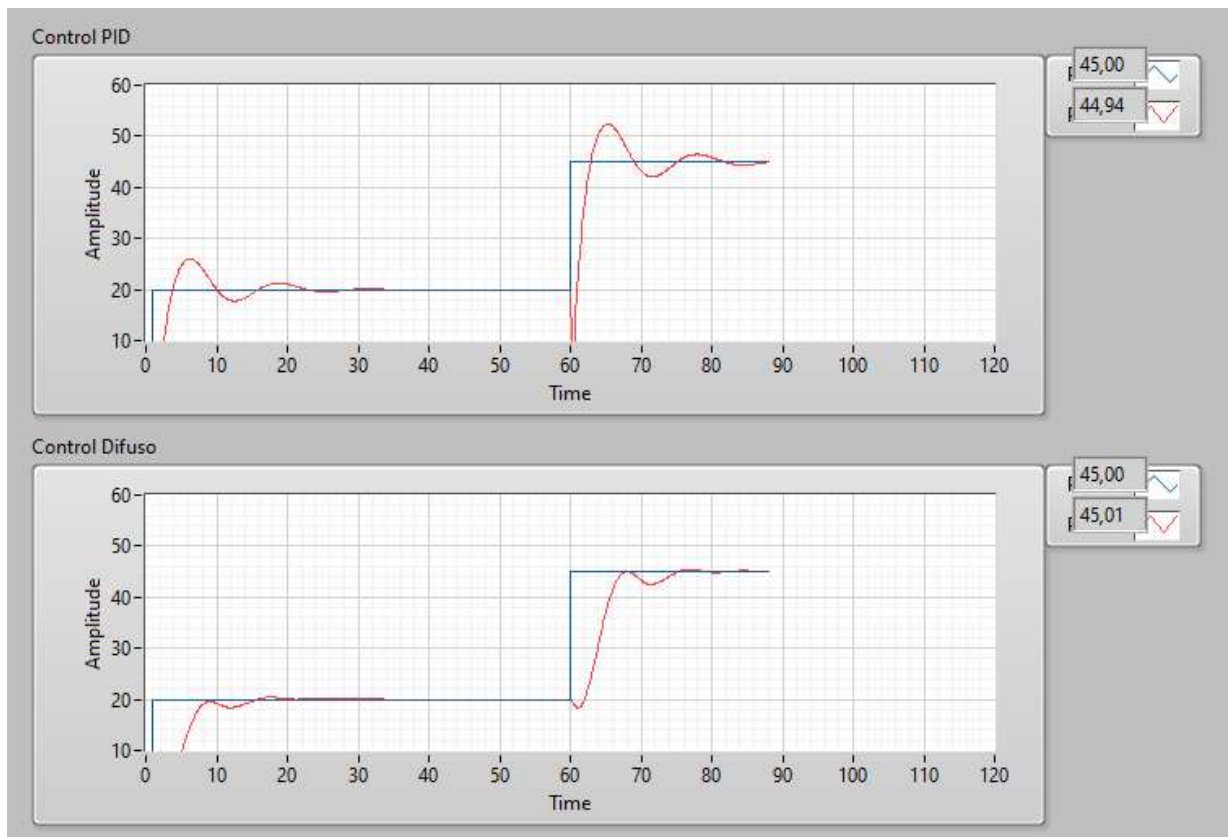


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 44, realizamos un cambio de SP de 20 (PSI) a 45 (PSI), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.02%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 44.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 45)*

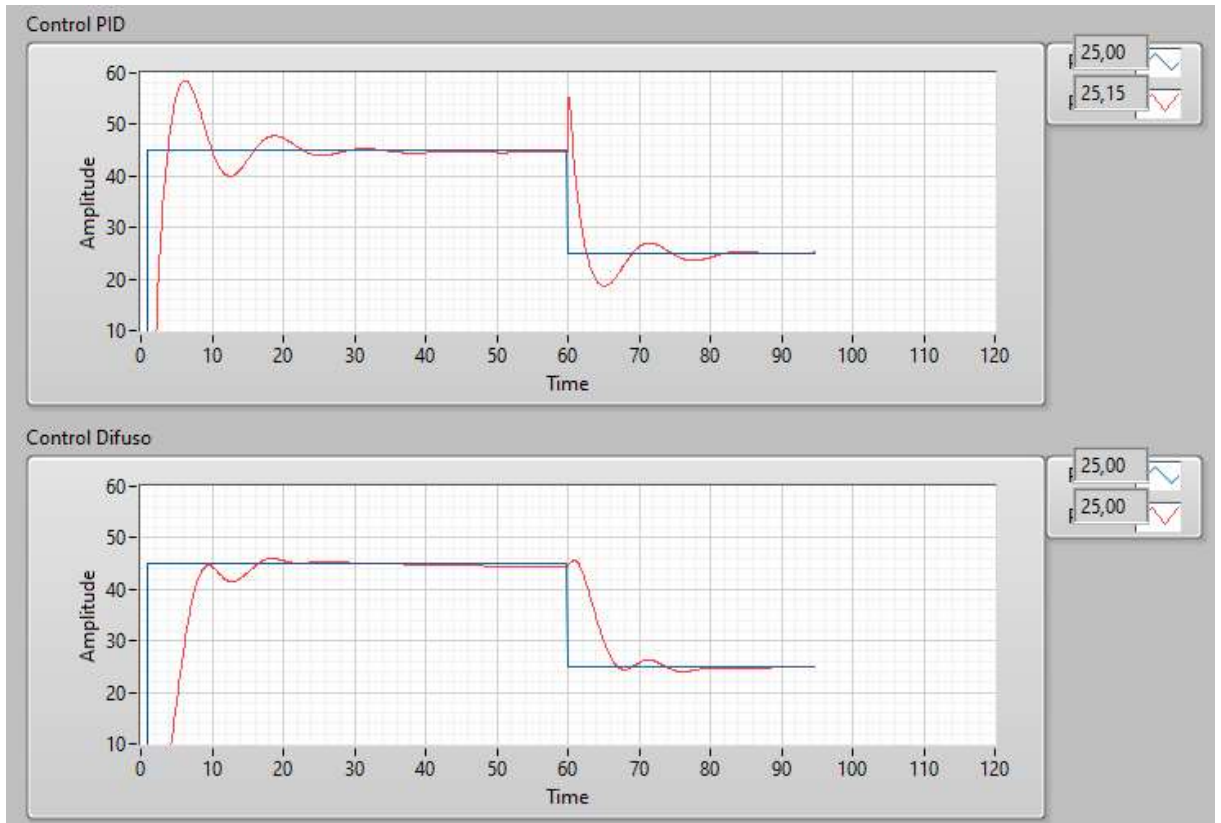


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 45, realizamos un cambio de SP de 45 (PSI) a 25 (PSI), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 45.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 25)*

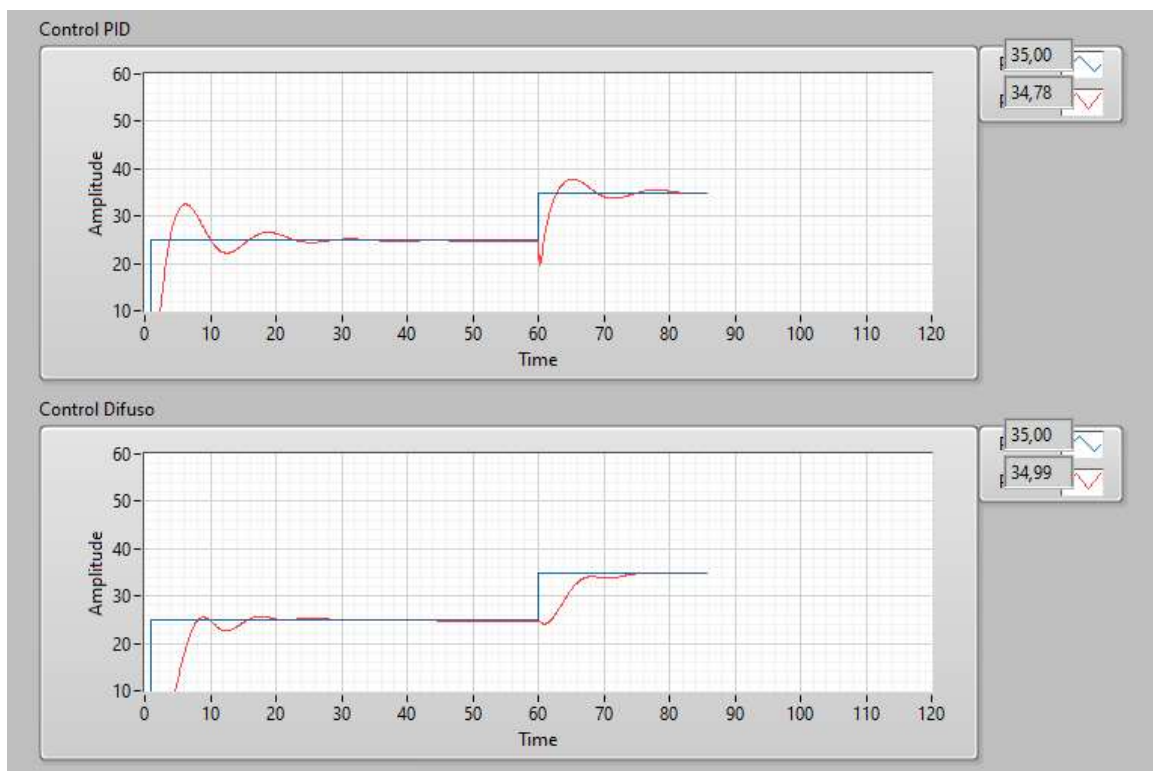


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 46, realizamos un cambio de SP de 25 (PSI) a 35 (PSI), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.03%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 46.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de presión (SP 35)*



Fuente: Elaboración propia, 2024

### **Análisis de resultado de la implementación del controlador difuso en el proceso de flujo.**

A partir de la relación entre la variable de proceso y el SP, la Tabla 5 muestra los resultados del % de error y el tiempo de estabilización en diversas circunstancias y puntos de consigna.

Los resultados del porcentaje del error en el proceso de caudal se obtienen aplicando la ecuación de la Figura 41,

**Tabla 5.**

*Resultados del Controlador Difuso del proceso de Flujo.*

<b>SP INICIAL (LPM)</b>	<b>SP FINAL (LPM)</b>	<b>PV (PSI)</b>	<b>TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN (SEG)</b>	<b>% DE ERROR</b>
12	45	45,05	19	0,11
45	18	18,08	19	0,44
18	38	38,01	18	0,03
38	28	28,08	19	0,29
45	12	12,08	20	0,67

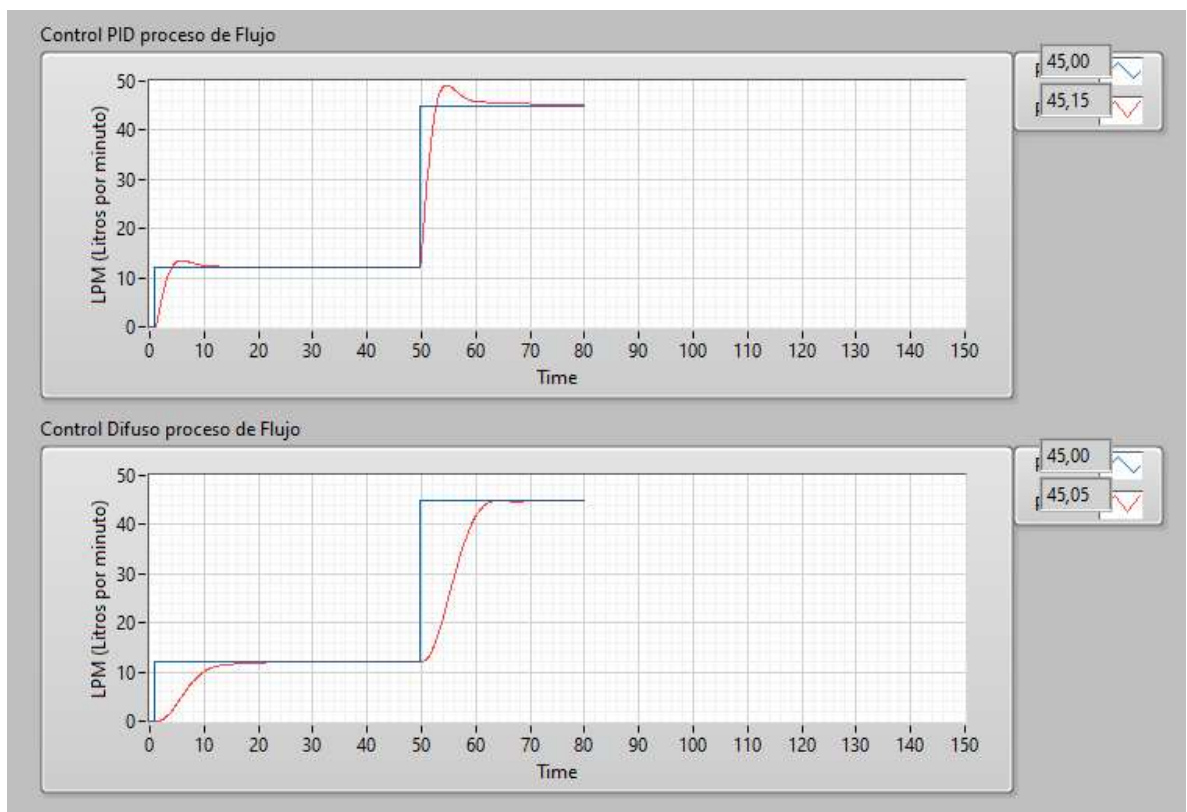
Fuente: Elaboración propia, 2024

Como puede verse en la Tabla 5, los resultados son los previstos, dados los resultados de las pruebas realizadas y el error estimado entre el PV y el SP.

En la Figura 47, realizamos un cambio de SP de 12 (LPM) a 45 (LPM), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable y rápido en controlar el sistema, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.11%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 47.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 45)*

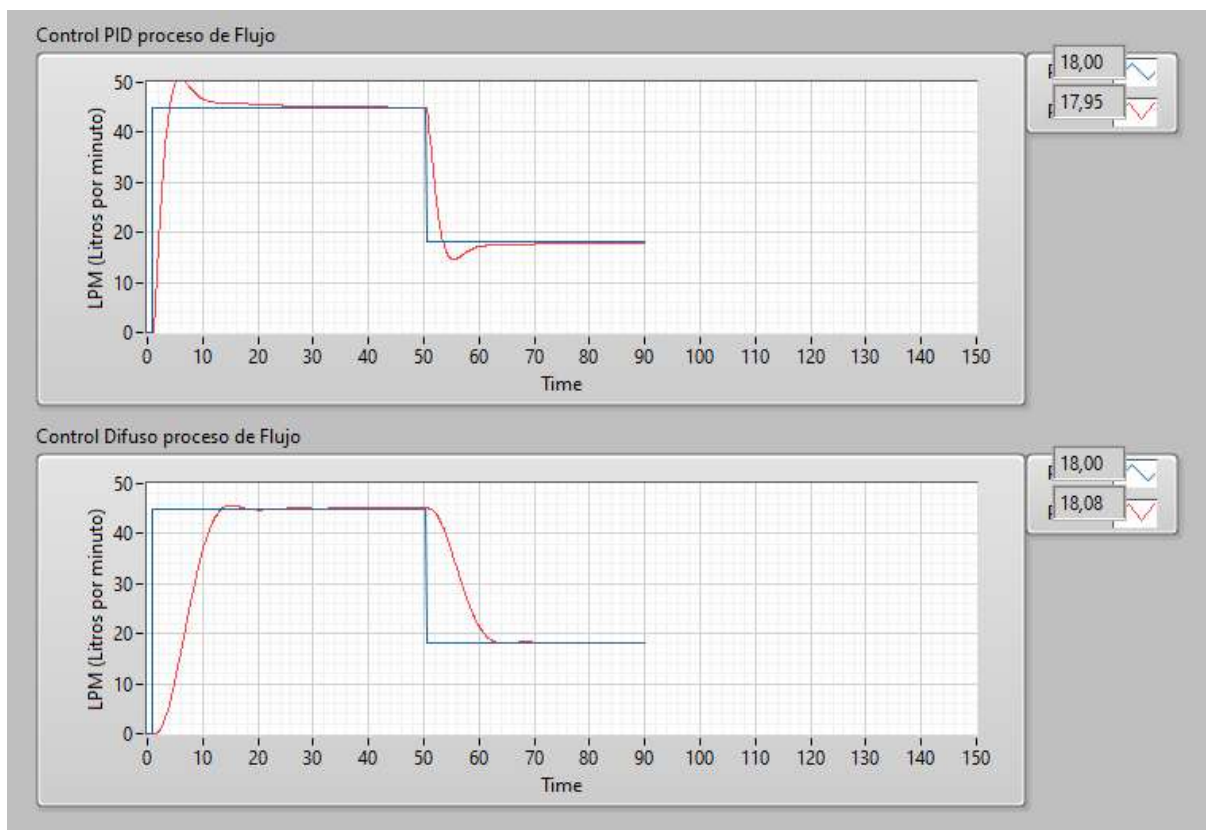


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 48, realizamos un cambio de SP de 45 (LPM) a 18 (LPM), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable y rápido en controlar el sistema, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.44%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 48.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 18)*

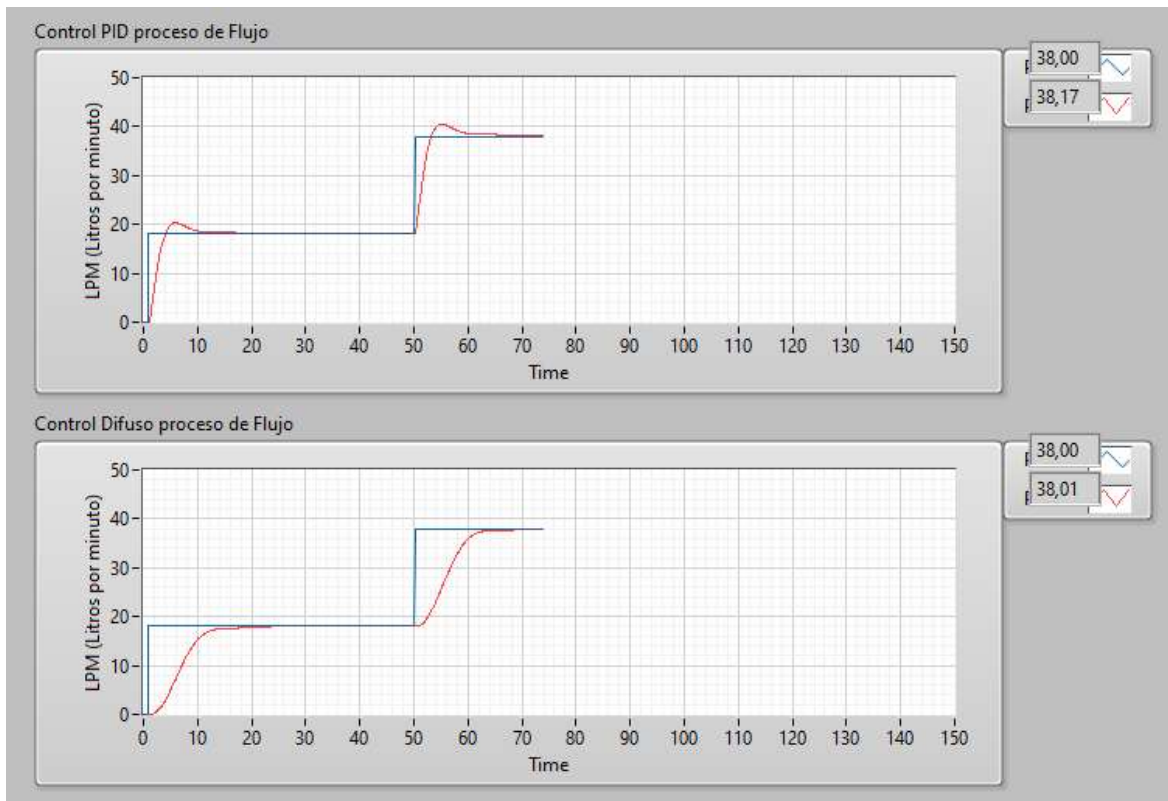


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 49, realizamos un cambio de SP de 18 (LPM) a 38 (LPM), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable y rápido en controlar el sistema, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.03%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 49.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 38)*



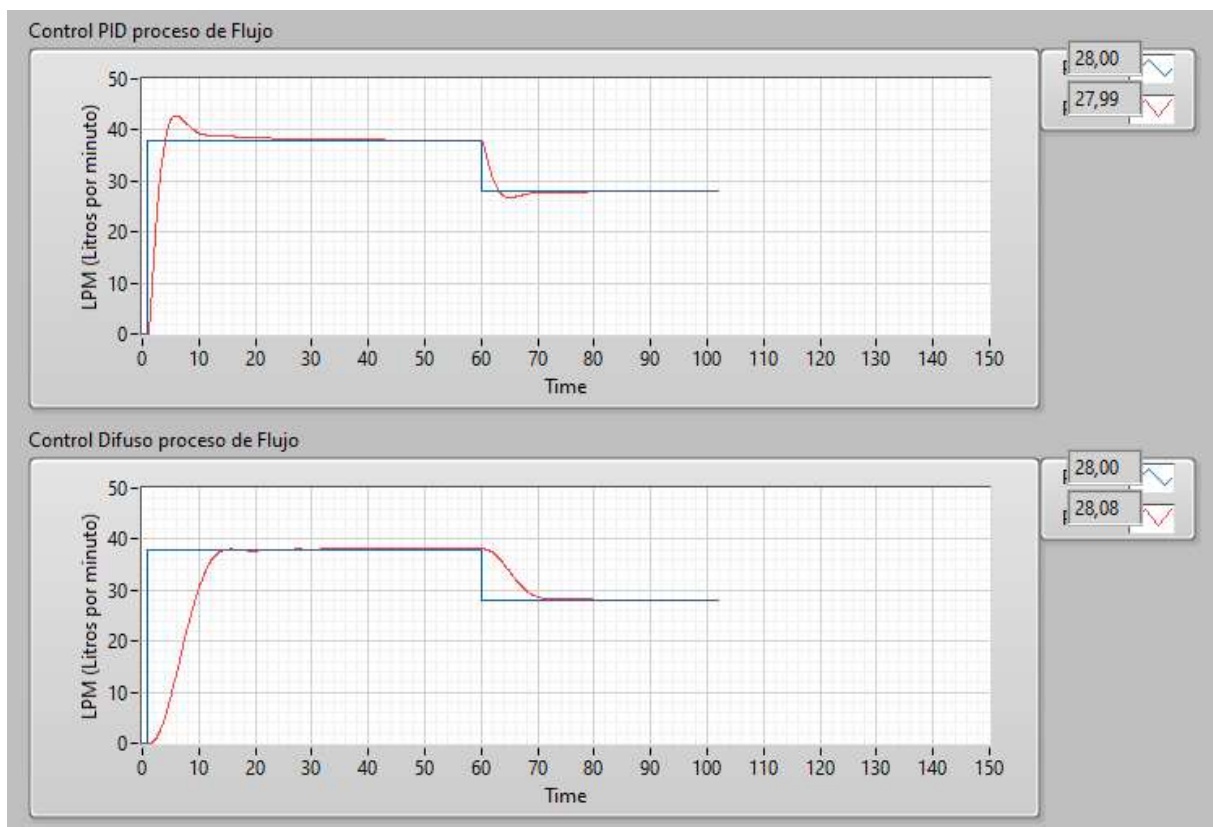
Fuente: Elaboración propia, 2024



En la Figura 50, realizamos un cambio de SP de 38 (LPM) a 28 (LPM), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable y rápido en controlar el sistema, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.29%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 50.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 28)*

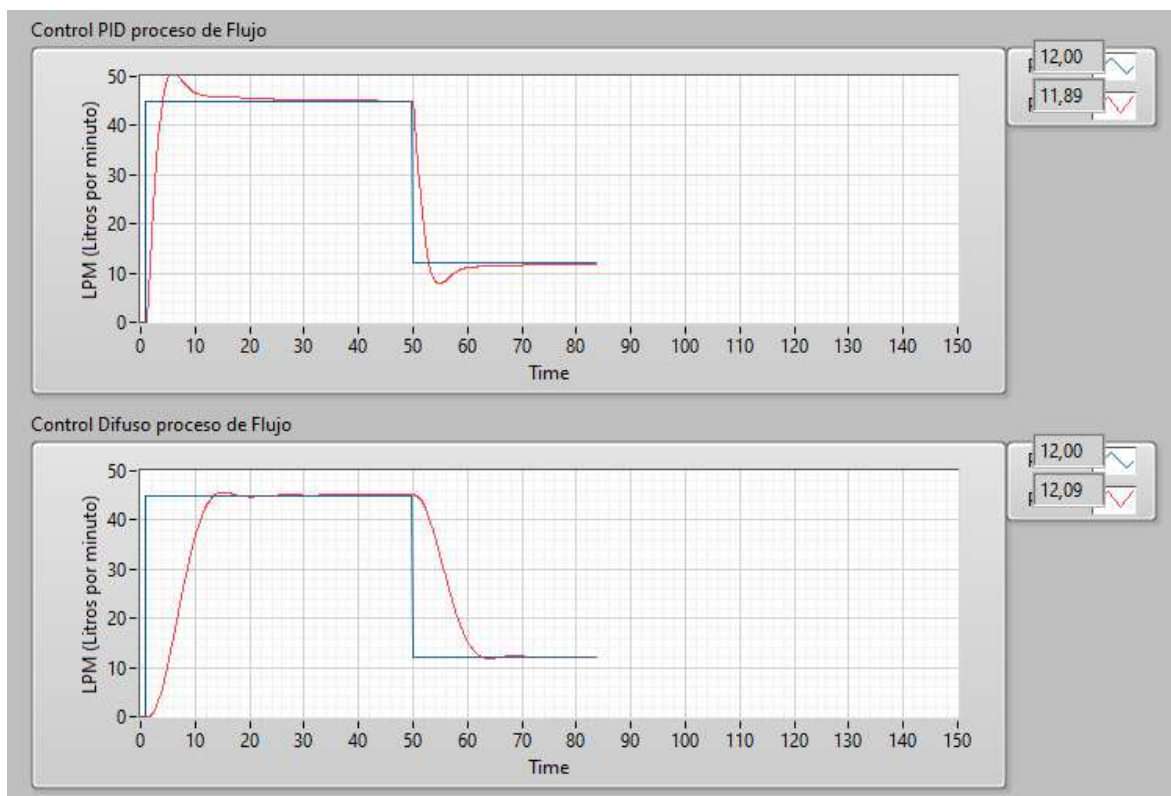


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 51, realizamos un cambio de SP de 45 (LPM) a 12 (LPM), donde podemos observar que el controlador difuso es mucho más estable y rápido en controlar el sistema, el controlador PID es más oscilatorio y tiene un mayor porcentaje de sobre impulso, así mismo el error en estado estable en el controlador difuso es 0.67%, en conclusión, para este ejercicio el controlador difuso presenta mejor robustez.

**Figura 51.**

*Control difuso frente al Control PID, del proceso de flujo (SP 12)*



Fuente: Elaboración propia, 2024

**Análisis de resultado del controlador difuso vs. un control tradicional implementado.**

**Control Difuso vs. PID aplicados al proceso Presión.**

La Tabla 6, proporciona un comparativo entre el desempeño de dos tipos de controladores, la lógica difusa y el PID, en un sistema de control de presión. Los datos están organizados en función de diferentes puntos de consigna (SP) y muestran la variable de proceso (PV) medida, el tiempo de estabilización y el porcentaje de error para cada tipo de controlador.

**Tabla 6.**

*Tabla comparativa del Control Difuso frente al Control PID aplicado al proceso de Presión.*

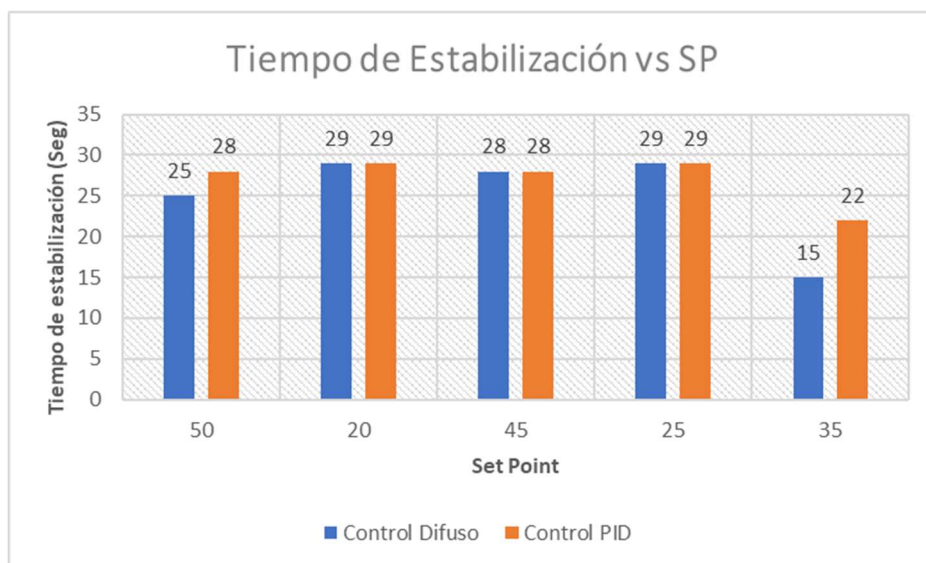
SP Inicial (PSI)	SP Final (PSI)	PV- Difuso (PSI)	PV- PID (PSI)	Estabilización Difuso (SEG)	Estabilización PID (SEG)	%Error Difuso	%Error PID
20	50	50	50,16	25	28	0	0,32
50	20	19,97	20,24	29	29	0,15	1,20
20	45	45,01	44,94	28	28	0,02	0,13
45	25	25	25,15	29	29	0	0,60
25	35	34,99	34,78	15	22	0,03	0,63

Fuente: Elaboración propia, 2024

Los valores de PV obtenidos con el controlador de lógica difusa son muy cercanos a los puntos de consigna en todos los casos. Por ejemplo, para un SP final de 20 PSI, la PV medida es exactamente 20 PSI. Esta precisión constante indica que la lógica difusa es efectiva para alcanzar con exactitud los valores deseados. Los valores de PV con el controlador PID también están cerca de los puntos de consigna, pero con algunas variaciones notables. Por ejemplo, para un SP final de 50 PSI, la PV medida es 50,16 PSI, lo que muestra un ligero desvío del valor deseado. En comparación con la lógica difusa, el PID presenta una mayor variabilidad en los resultados.

**Figura 52.**

*Tiempos de estabilización vs SP en el proceso de Presión*

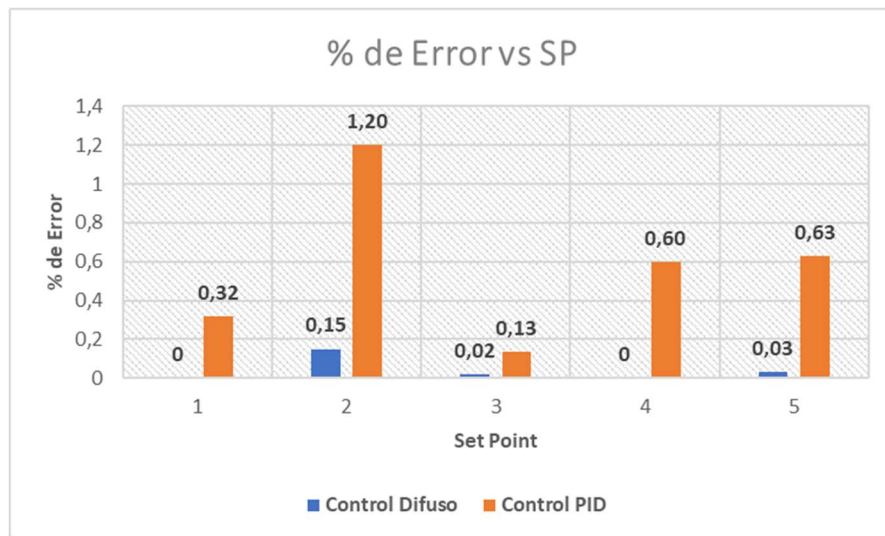


Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 52, se evidencia que los tiempos de estabilización con el controlador de lógica difusa son generalmente más cortos. Por ejemplo, para el cambio de SP de 25 PSI a 35 PSI, el tiempo de estabilización es de 15 segundos, lo que es significativamente menor en comparación con el PID para el mismo caso. El tiempo de estabilización del PID es, en general, más largo. En el caso mencionado, el tiempo de estabilización es de 22 segundos, que es 7 segundos más largo que con lógica difusa. Esto sugiere que el PID puede tardar más en alcanzar un estado estable.

**Figura 53.**

*Porcentaje de error vs SP en el proceso de Presión*



Fuente: Elaboración propia, 2024

El porcentaje de error con el controlador de lógica difusa es casi nulo en todos los casos como muestra la Figura 53. Por ejemplo, para el cambio de SP de 20 PSI a 50 PSI, el error es 0%. Esta precisión refleja la capacidad de la lógica difusa para mantener los errores en niveles muy bajos. El porcentaje de error con el controlador PID es mayor en comparación con la lógica difusa. Por ejemplo, en el caso con SP final de 50 PSI, el error es 0,32%. Esto sugiere que el PID tiende a tener un mayor margen de error en la regulación de la presión.

### **Control Difuso frente al controlador PID aplicados al proceso de Flujo.**

La Tabla 7, proporciona un comparativo entre el desempeño de dos tipos de controladores, la lógica difusa y el PID, en un sistema de control de caudal. Los datos están organizados en función de diferentes puntos de consigna (SP) y muestran la variable de proceso (PV) medida, el tiempo de estabilización y el porcentaje de error para cada tipo de controlador.

**Tabla 7.**

*Tabla comparativa del Control Difuso frente al Control PID aplicado al proceso de Flujo.*

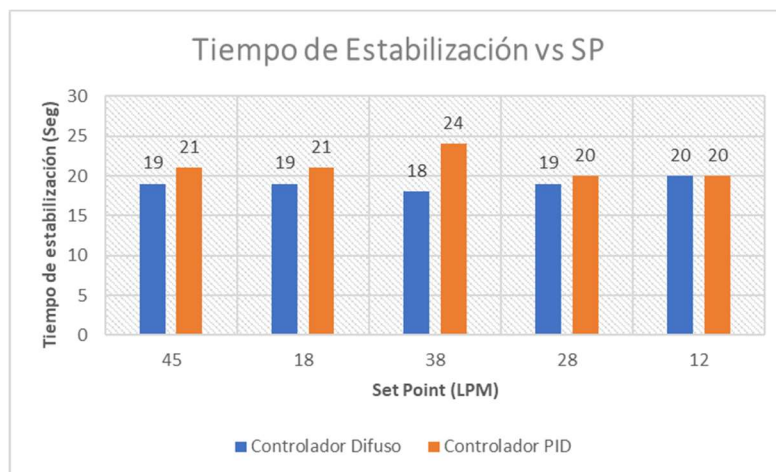
SP Inicial (LPM)	SP Final (LPM)	PV- Difuso (LPM)	PV- PID (LPM)	Estabilización Difuso (SEG)	Estabilización PID (SEG)	%Error Difuso	%Error PID
12	45	45,05	45,15	19	21	0,11	0,33
45	18	18,08	17,9	19	21	0,44	0,56
18	38	38,01	38,17	18	24	0,03	0,45
38	28	28,08	27,69	19	20	0,29	1,11
45	12	12,09	11,89	20	20	0,67	0,92

Fuente: Elaboración propia, 2024

A continuación, se presenta un análisis por parámetro: Con respecto al control de la variable del proceso, en general, los valores de PV obtenidos con el controlador de lógica difusa están muy cercanos a los puntos de consigna especificados. Por ejemplo, con un SP final de 12 LPM, la PV medida es de 12,09 LPM, y con un SP de 45 LPM, la PV medida es de 45,05 LPM. Estos resultados indican una buena capacidad de la lógica difusa para alcanzar los valores deseados, los resultados con el controlador PID también muestran que los valores de PV están cerca de los puntos de consigna, aunque con algunas variaciones más amplias en comparación con la lógica difusa. Por ejemplo, para un SP final de 12 LPM, la PV medida es de 11,89 LPM, que es ligeramente inferior al valor deseado.

**Figura 54.**

*Tiempos de estabilización vs SP en el proceso de Flujo*

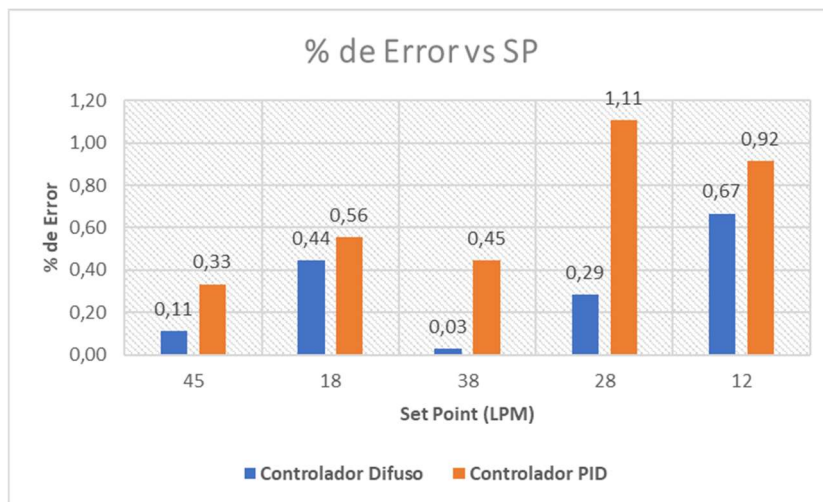


Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se muestra en la Figura 54, los tiempos de estabilización con el controlador de lógica difusa varían, pero tienden a ser competitivos, y en algunos casos incluso más cortos. Por ejemplo, para el cambio de SP de 18 LPM a 38 LPM, el tiempo de estabilización es de 18 segundos, en comparación con los 24 segundos con PID. El tiempo de estabilización del PID muestra una mayor variabilidad, con tiempos que en algunos casos son más largos que los de la lógica difusa. Por ejemplo, el cambio de SP de 18 LPM a 38 LPM resulta en un tiempo de estabilización de 24 segundos con PID frente a 18 segundos con lógica difusa. Sin embargo, en el caso de cambio de SP de 45 LPM a 12 LPM, ambos controladores tienen un tiempo de estabilización igual de 20 segundos.

**Figura 55.**

*Porcentaje de error vs SP en el proceso de Flujo.*



Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 55, se puede apreciar el porcentaje de error con el controlador de lógica difusa es generalmente menor en comparación con el PID. Por ejemplo, en el primer caso, el error es de 0,11%, mientras que con PID es de 0,33%. La lógica difusa muestra un error mínimo en la mayoría de las pruebas, lo que sugiere una mayor precisión en la regulación del proceso. Aunque el controlador PID también mantiene errores relativamente bajos, estos son consistentemente más altos en comparación con los errores obtenidos con la lógica difusa. En el caso con SP inicial de 45 LPM y final de 12 LPM, el error con PID es de 0,92% frente a 0,67% con lógica difusa.

## CONCLUSIONES

El diseño de controladores avanzados de lógica difusa para estaciones de prueba de procesos industriales presenta ventajas significativas en comparación con los controladores PID tradicionales ya que la lógica difusa ofrece una mayor flexibilidad y adaptabilidad al manejar incertidumbres y variaciones en el proceso, permitiendo una regulación más precisa y robusta en condiciones complejas.

Los controladores basados en lógica difusa pueden ajustarse de manera más eficaz a los cambios dinámicos en el sistema, mientras que los PID, aunque efectivos en condiciones estables y bien definidas, pueden enfrentar limitaciones al lidiar con sistemas no lineales o con variaciones impredecibles.

La contextualización de los fundamentos teóricos sobre la identificación de modelos matemáticos, los controladores avanzados, la programación de control difuso en LabVIEW y los dispositivos de control proporciona una base sólida para la implementación efectiva de sistemas de control modernos. La identificación de modelos matemáticos permite comprender y describir con precisión el comportamiento de los sistemas, lo cual es crucial para el diseño y la optimización de controladores avanzados.

La integración de controladores avanzados y la programación de control difuso en LabVIEW facilita el desarrollo de soluciones adaptativas y precisas, al mismo tiempo que simplifica la interfaz y la interacción con los dispositivos de control, la combinación de teorías y herramientas prácticas no solo mejora la capacidad de respuesta y la estabilidad de los sistemas de control, sino que también permite la personalización y la adaptación a requisitos específicos, optimizando así el rendimiento en una variedad de aplicaciones industriales y de investigación.

La identificación de modelos matemáticos de una planta de pruebas utilizando el software MATLAB proporciona una herramienta poderosa para la comprensión y análisis detallado de sistemas complejos, ya que MATLAB ofrece una gama de herramientas y técnicas avanzadas para la modelización y simulación, permitiendo la obtención precisa de modelos matemáticos que representan el comportamiento dinámico de la planta.

La implementación de controladores PID proporciona un enfoque clásico y probado en sistemas lineales y estables, mientras que los controladores basados en lógica difusa ofrecen una ventaja adicional en términos de flexibilidad y adaptación a sistemas no lineales o con incertidumbres.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda considerar la implementación de estos controladores en entornos industriales donde se enfrentan incertidumbres y variaciones significativas en los procesos. La capacidad de la lógica difusa para gestionar condiciones complejas y proporcionar una regulación precisa puede mejorar notablemente la eficiencia y la estabilidad operativa. Además, se sugiere evaluar la viabilidad de los controladores basados en lógica difusa para aplicaciones específicas y realizar pruebas piloto para aprovechar sus beneficios en la optimización y el control avanzado de procesos industriales.

Se sugiere emplear controladores basados en lógica difusa en situaciones donde los sistemas enfrentan cambios dinámicos, comportamientos no lineales o variaciones impredecibles, dado que estos controladores proporcionan una adaptabilidad superior en tales contextos ya que los controladores PID solamente son efectivos en sistemas estables y claramente definidos, pueden no ser suficientes en escenarios que demandan una mayor flexibilidad.

Se aconseja garantizar una comprensión profunda y una aplicación rigurosa de los fundamentos teóricos relacionados con la identificación de modelos matemáticos, los controladores avanzados, la programación de control difuso en LabVIEW y los dispositivos de control para lograr una implementación efectiva de sistemas de control modernos, la aplicación de estos principios teóricos permite una caracterización precisa del comportamiento de los sistemas, lo cual es fundamental para el diseño y la optimización de controladores avanzados.

Aprovechar la integración de controladores avanzados y la programación de control difuso en LabVIEW para desarrollar soluciones adaptativas y precisas. Se recomienda utilizar LabVIEW para simplificar la interfaz y la interacción con los dispositivos de control, así como para personalizar y adaptar los sistemas de control a requisitos específicos. Esta estrategia puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta, estabilidad y rendimiento en aplicaciones industriales y de investigación, maximizando la efectividad de los sistemas de control.

Implementar el software MATLAB para la identificación de modelos matemáticos de plantas de pruebas, dado que ofrece herramientas avanzadas para la modelización y simulación. Se recomienda utilizar MATLAB para obtener representaciones precisas del comportamiento dinámico de los sistemas, lo cual facilita una comprensión detallada y un análisis riguroso de sistemas complejos. Esta práctica puede mejorar la calidad y la exactitud de los modelos matemáticos, optimizando el diseño y la implementación de estrategias de control.



Considerar la implementación de controladores PID en sistemas lineales y estables, donde su enfoque probado y clásico es adecuado. Para sistemas no lineales o con incertidumbres, se recomienda utilizar controladores basados en lógica difusa debido a su mayor flexibilidad y capacidad de adaptación. Esta selección basada en las características específicas del sistema puede mejorar el rendimiento del control, adaptándose mejor a las variaciones y desafíos inherentes a diferentes entornos operativos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Gutiérrez, M. (2024). Modelado, control y simulación de procesos mediante Matlab Simulink y PLC a través de protocolo OPC UA. Repositorio Institucional de la Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/33237>
- Ghia, E. (2024). Diseño e implementación de un controlador en el espacio de estados para el control de la velocidad de un motor de corriente directa usando LabVIEW. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27726/1/UPS-GT005222.pdf>
- Muñiz, A. (2021, June 1). Integración de IA en el diseño industrial: Cómo la inteligencia artificial transforma la industria. LinkedIn Pulse. <https://es.linkedin.com/pulse/integraci%C3%B3n-de-ia-en-el-dise%C3%B1o-industrial-c%C3%B3mo-la-artificial-muniz-ztbve>
- Reyes, A. (2021) Diseño e implementación de un controlador de nivel utilizando lógica difusa con plc s7-1500. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20450/1/UPS-GT003266.pdf>
- Jácome, P. (2022). Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa. Universidad Israel. <https://repositorio.uisrael.edu.ec/xmlui/handle/47000/3321>
- MathWorks. (n.d.). Identificación de sistemas - MATLAB & Simulink. <https://es.mathworks.com/products/sysid.html>
- Ponce, P. (2010). Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería. Alfaomega. <https://www.coursehero.com/es/file/p53hc17/3-Inteligencia-artificial-con-aplicaciones-a-la-ingenier%C3%ADa-Ponce-Alfaomega>
- Profinet University. (n.d.). Controladores para automatización industrial. <https://profinetuniversity.com/automatizacion-industrial/controladores-para-automatizacion/>
- SD Industrial. (n.d.). ¿Qué es un controlador industrial? <https://sdindustrial.com.mx/blog/que-es-un-controlador-industrial/>
- National Instruments. (n.d.). CompactRIO. <https://www.ni.com/es/shop/compactrio.html>
- Indusoft. (n.d.). Sistemas de gestión y control industrial con LabVIEW. <https://www.indusoft.pe/blog/sistemas-de-gestion-y-control-industrial-con-labview/>

## ANEXO 1

### Manual para la Implementación de un Controlador Fuzzy Logic en LabVIEW

#### 1. Introducción

Un controlador fuzzy (o difuso) es un tipo de controlador que utiliza lógica difusa en lugar de lógica binaria para manejar sistemas complejos e inciertos. LabVIEW proporciona herramientas para diseñar y simular controladores fuzzy utilizando su Toolkit de Lógica Difusa.

#### 2. Requisitos

Software: LabVIEW (versión que incluya el Toolkit de Lógica Difusa).

Conocimientos previos: Familiaridad con LabVIEW y conceptos básicos de lógica difusa.

#### 3. Diseño del Controlador Fuzzy

##### 3.1. Definir el Problema

- Identificar las variables de entrada y salida. Ejemplo: Para un sistema de control de temperatura, las entradas podrían ser la temperatura actual y la temperatura deseada, mientras que la salida podría ser la potencia de calefacción.

- Establecer las reglas fuzzy. Ejemplo: Si la temperatura actual es baja y la temperatura deseada es alta, entonces aumenta la potencia de calefacción.

##### 3.2. Crear el Sistema de Control Fuzzy

###### **Abrir LabVIEW.**

Inicia LabVIEW y crear un nuevo proyecto.

Instalar el Toolkit de Lógica Difusa.

Asegurarse de que el Toolkit de Lógica Difusa esté instalado. Se puede verificar en Herramientas > Complementos.

###### **Crear un nuevo VI (Virtual Instrument).**

Abrir un nuevo VI en LabVIEW.

Diseñar el Controlador Fuzzy:

###### **Crear el Diagrama de Bloques:**

Ir al panel de funciones y busca el Toolkit de Lógica Difusa.

Arrastrar y colocar los bloques necesarios: Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Inference System, Membership Functions, etc.

**Definir las Funciones de Membresía:**

Definir las funciones de membresía para las entradas y salidas.

Se Puede usar funciones como Triangular, Trapezoidal, Gaussian, etc.

**Establecer las Reglas:**

Usar el bloque de Fuzzy Inference System para definir las reglas en una tabla.

Introducir las reglas según el diseño previo.

**Configuración del Controlador Fuzzy:**

Conectar los bloques de entrada y salida al controlador fuzzy.

Ajustar los parámetros del controlador según sea necesario.

**4. Implementación****4.1. Crear el Front Panel****Añadir Controles e Indicadores:**

En el Front Panel, agregar controles (para las entradas) e indicadores (para las salidas) para interactuar con el controlador fuzzy.

**Configurar los Controles:**

Ajustar las propiedades de los controles e indicadores para que reflejen adecuadamente los datos de entrada y salida del controlador.

**4.2. Programar el Diagrama de Bloques****Conectar los Controles e Indicadores:**

Conectar los controles del Front Panel a los bloques correspondientes en el Diagrama de Bloques.

**Implementar la Lógica de Control:**

Asegurarse de que la lógica de control y las reglas fuzzy estén correctamente implementadas y conectadas.

## **5. Prueba y Validación**

### **Simular el Controlador:**

Ejecutar el VI y observa cómo responde el controlador a diferentes valores de entrada.

### **Ajustar Parámetros:**

Realizar ajustes a las funciones de membresía y las reglas fuzzy según sea necesario para mejorar el rendimiento del controlador.

### **Verificar Resultados:**

Comparar los resultados obtenidos con los resultados esperados para validar el comportamiento del controlador fuzzy.

## **6. Documentación y Mantenimiento**

### **Documentar el Diseño:**

Escribir una documentación detallada sobre el diseño, las funciones de membresía, las reglas, y el comportamiento del controlador.

### **Guardar el Proyecto:**

Guardar el proyecto de LabVIEW y realiza copias de seguridad periódicas.

### **Actualizar el Controlador:**

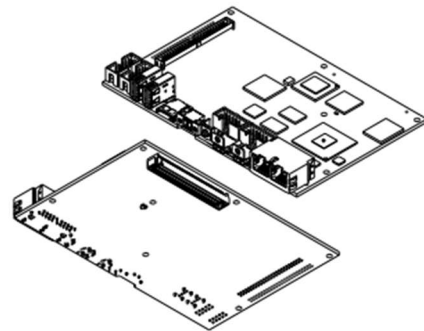
Asegurarse de revisar y actualizar el controlador según sea necesario para mantener su efectividad y precisión.

## ANEXO 1

### ESPECIFICACIONES NI SBRIO-9629

El sbRIO-9629 es un controlador CompactRIO de tarjeta única embebido que integra un procesador en tiempo real, una FPGA reconfigurable por el usuario y entradas/salidas digitales en una sola placa de circuito impreso (PCB). Puedes incorporar el sbRIO-9629 en aplicaciones OEM de alto volumen que requieren flexibilidad, fiabilidad y alto rendimiento. Este controlador cuenta con dos conectores Ethernet Gigabit, dos puertos seriales RS-232, un puerto RS-485, un puerto CAN, microSDHC, dieciséis entradas analógicas de 16 bits, cuatro salidas analógicas de 16 bits, cuatro puertos de E/S digitales tolerantes a 5 V, y un conector de tarjeta mezzanine RIO (RMC) de alta densidad que proporciona la opción de conectar dos módulos de E/S de la Serie C y 96 líneas de E/S digitales de 2.5 V/3.3 V de un solo extremo o 45 pares diferenciales.

- NI-DAQmx support for C Series modules and onboard I/O as well as I/O expansion using CompactDAQ or FieldDAQ
- TSN support on both Gigabit Ethernet ports
- Display capable through USB Type-C host port
- LVDS support for 45 RMC DIO lines
- PCIe x1 Gen 2.0 and SATA Gen 2.0 over RMC

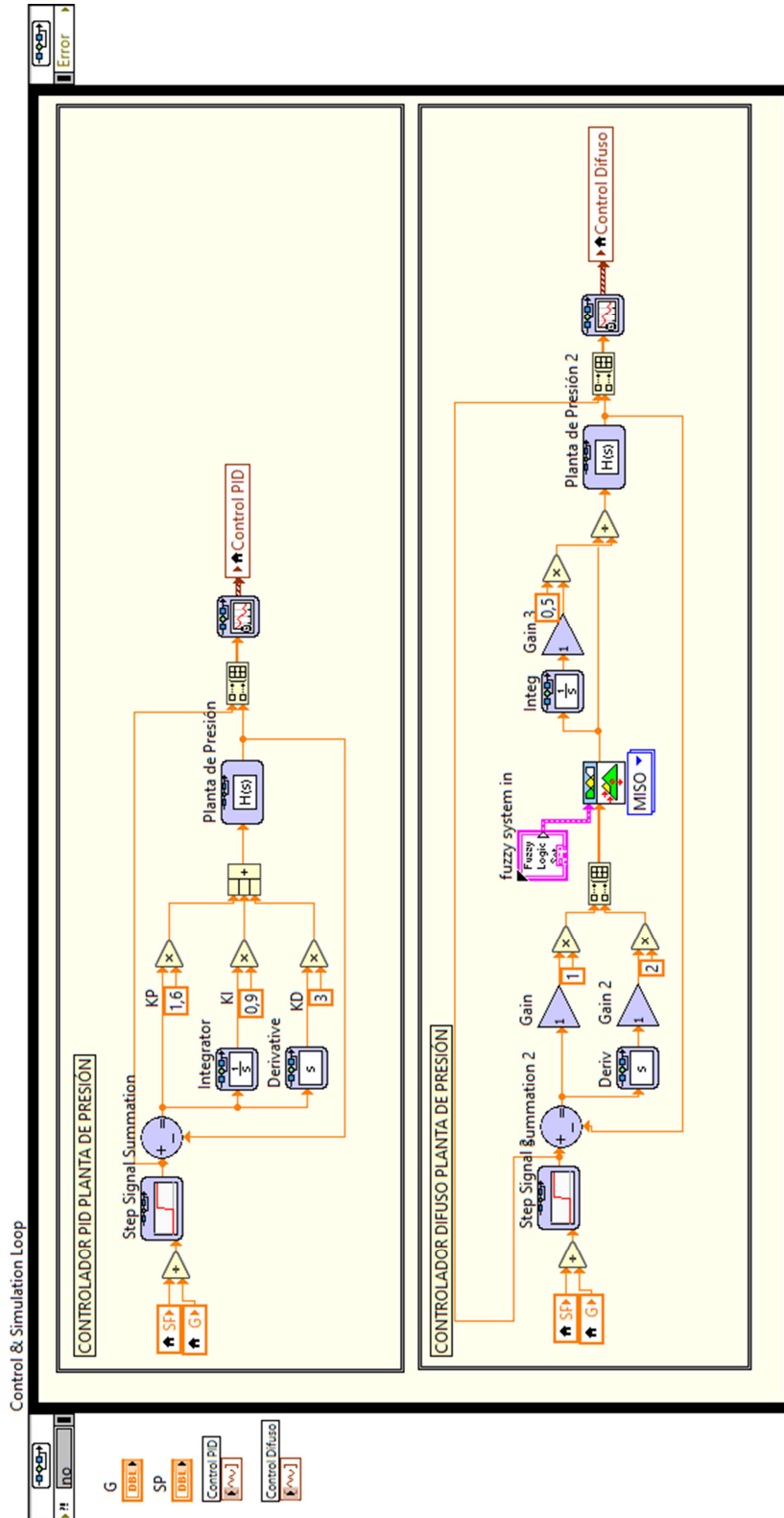


**Table 1.** CompactRIO Single Board Controller with DAQmx Model Comparison

Components	sbRIO-9603	sbRIO-9608	sbRIO-9609	sbRIO-9628	sbRIO-9629	sbRIO-9638
<b>Part Number</b>						
Development Kit Part Number	787287-01	787288-01	787289-01	787296-01	787298-01	787297-01
OEM Kit Part Number	787287-02	787288-02	787289-02	787296-02	787298-02	787297-02
<b>Performance</b>						
Processor	Intel E3805 1.33 GHz Dual-Core	Intel E3845 1.91 GHz Quad-Core	Intel E3825 1.33 GHz Dual-Core	Intel E3845 1.91 GHz Quad-Core	Intel E3805 1.33 GHz Dual-Core	Intel E3805 1.33 GHz Dual-Core
RAM (DDR3L)	1 GB	2 GB	1 GB	2GB	1 GB	1 GB
Disk (eMMC)	4 GB					
Xilinx Artix-7 FPGA	XC7A75T	XC7A200T	XC7A100T	XC7A200T	XC7A100T	XC7A100T
<b>Onboard Peripherals</b>						
Ethernet	2x IEEE 802.1AS-2011 IEEE 1588-2008 (default end-to-end profile)					
USB Type-C port	USB 2.0 device					
USB Type-C port	1x USB 3.1 Gen1 Host					
DisplayPort Alt Mode	No	Yes				No
USB Type-A port	—			2x USB 2.0 host		
SD port	—			microSDHC		
CAN port	1x CAN FD					
RS-232 port	1x			2x		
RS-485 port	—			1x		

## ANEXO 2

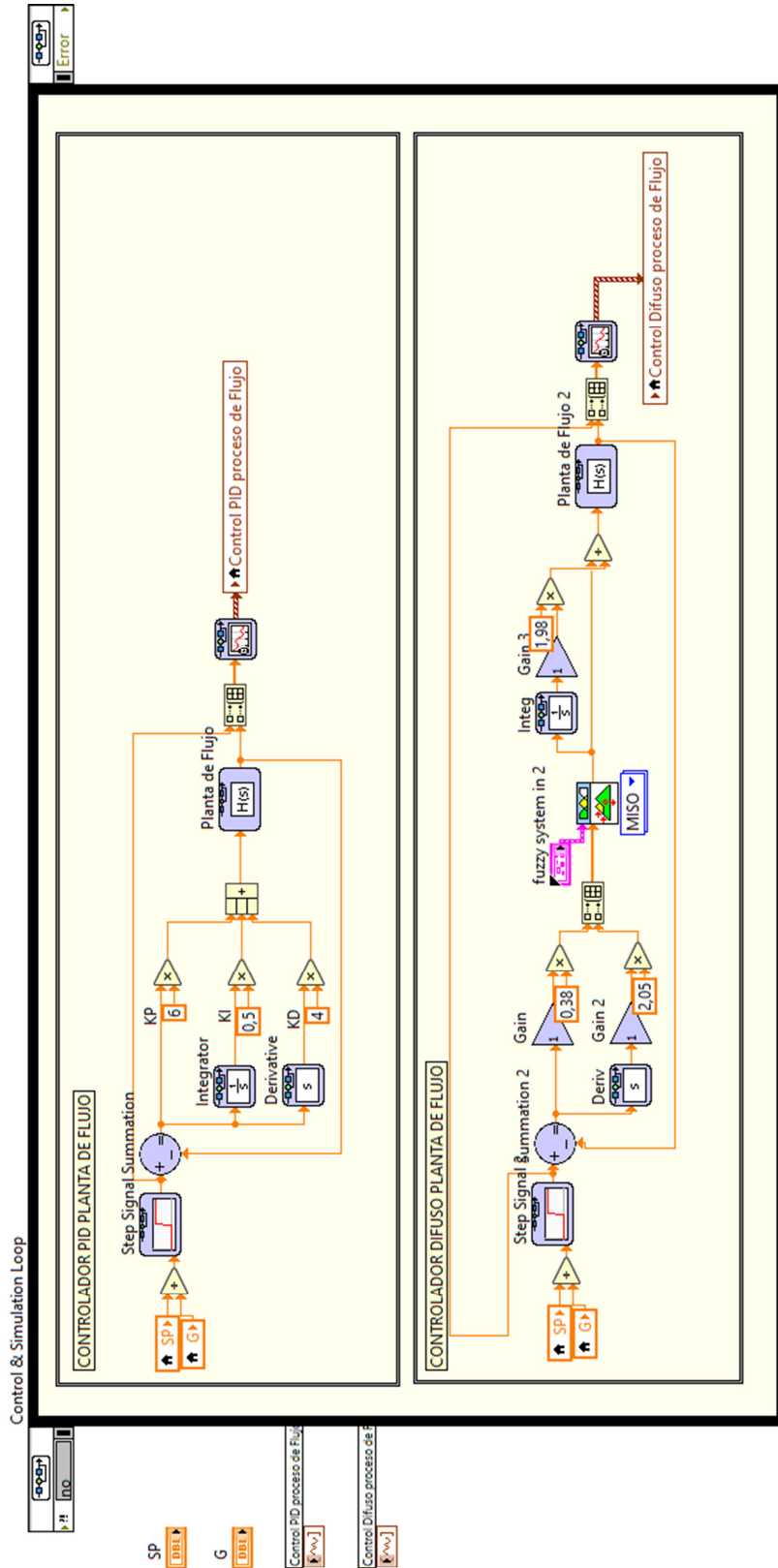
### DIAGRAMA PROGRAMACIÓN DE CONTROLADORES DE PRESIÓN





# ANEXO 3

## DIAGRAMA PROGRAMACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO





Yo, **QUIMBITA ZAPATA WILMER ENRIQUE**, con C.I 0503373177, en mi calidad de autor de la propuesta del proyecto titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE AVANZADOS CON LÓGICA DIFUSA APLICADOS A ESTACIONES DE PRUEBAS INDUSTRIALES.**

Elaborado por el Ing. **ERICK ALEXANDER QUIMBITA PANCHI**, como estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister en Ingeniería, declaro haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 03 de Septiembre de 2024

**QUIMBITA ZAPATA WILMER ENRIQUE**

**C.I 0503373177**

**Registro SENESCYT 1079-2022-2554586**



Yo, **CULQUI TIPAN JAVIER FERNANDO**, con C.I **0503006454**, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES AVANZADOS CON LÓGICA DIFUSA APLICADOS A ESTACIONES DE PRUEBA DE PROCESOS INDUSTRIALES**.

Elaborado por el Ing. **ERICK ALEXANDER QUIMBITA PANCHI**, con C.I **0502985575**, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 03 de Septiembre de 2024

**CULQUI TIPAN JAVIER FERNANDO**

**C.I 0503006454**

**Registro SENESCYT 1020-2023-2612911**



Yo, **CRUZ PANCHI LUIS ROLANDO**, con C.I **0502595176**, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES AVANZADOS CON LÓGICA DIFUSA APLICADOS A ESTACIONES DE PRUEBA DE PROCESOS INDUSTRIALES**.

Elaborado por el Ing. **ERICK ALEXANDER QUIMBITA PANCHI**, con C.I **0502985575**, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 03 de Septiembre de 2024

**CRUZ PANCHI LUIS ROLANDO**

**C.I 0502595176**

**Registro SENESCYT 1034-2022-2560769**