



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de Energía, las Industrias y Recursos Naturales No

Renovables

Carrera de Electromecánica

Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de automatización.

Trabajo de Integración Curricular previo, a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico.

AUTOR:

Jhandry Fernando Sotomayor Japón

DIRECTOR:

Ing. Julio César Cuenca Tinitana Mg.Sc.

Loja – Ecuador

2024

Certificado

Loja, 15 de febrero de 2024

Ing. Julio César Cuenca Tinitana. Mg.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de Automatización.** de autoría del estudiante **Jhandry Fernando Sotomayor Japón**, con cédula de identidad **Nro.1105913485** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**. Una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, apruebo y autorizo la presentación para los trámites de titulación.



Firmado electrónicamente por:
**JULIO CESAR CUENCA
TINITANA**

Ing. Julio César Cuenca Tinitana Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Jhandry Fernando Sotomayor Japón** declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de identidad: 1105913485

Fecha: 15 de febrero de 2024

Correo electrónico: jhandry.sotomayor@unl.edu.ec

Teléfono: 0988306210

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Jhandry Fernando Sotomayor Japón**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de Automatización**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los quince días del mes de febrero de dos mil veinticuatro.

Firma:



Autor: Jhandry Fernando Sotomayor Japón

Cédula: 1105913485

Dirección: Loja, (Barrio San José Alto)

Correo electrónico: jhandry.sotomayor@unl.edu.ec

Teléfono: 0988306210

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular: Ing. Julio César Cuenca Tinitana Mg. Sc.

Dedicatoria

El presente Trabajo de Integración Curricular lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos la fuerza de continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Rafael Sotomayor e Irma Japón, mis abuelos Ángel Japón y Mercy Gutiérrez quienes con su esfuerzo, amor, paciencia y sacrificio me han apoyado en esta travesía de estudio, gracias por inculcar el ejemplo de constancia y esfuerzo, de no tener adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Mi hermano de toda la vida Víctor Japón y mi familia por estar siempre presentes, por el apoyo moral durante todo el tiempo de estudio y dificultades en la vida.

Mi novia Gabriela Armijos quien a lo largo de este tiempo me ha enseñado en el valor de los detalles de la vida, en el mejoramiento continuo, su apoyo y ánimo que me brinda cada día para alcanzar mis metas tanto profesionales como personales.

Mis maestros de la carrera de Electromecánica, al Ing. Julio Cuenca por la guía y ayuda en la formulación de este documento

Jhandry Fernando Sotomayor Japón

Agradecimiento

A mis docentes por compartir sus conocimientos y experiencias, con el objeto de formar profesionales, para servir a la sociedad Al ver el resultado logrado con este ambicioso proyecto, solamente se me ocurre una palabra: ¡Gracias!

Gracias profundamente a mis padres quienes me han ayudado mucho en mis estudios, mi formación personal, que me dieron todo lo que necesite.

Al Ing. Julio Cuenca por su asesoría y ayuda en el camino del conocimiento, quien con su asistencia en esta investigación representa un objetivo muy grande en mi desarrollo profesional.

A mi Universidad, mis docentes de la carrera de Electromecánica por permitirme desarrollar mis conocimientos, me han enseñado sus saberes, vivencias, experiencias las cuales me han ayudado mucho en mi formación como un futuro profesional

A mi compañera y novia por su apoyo moral, motivación en cada día, quien me has enseñado y me sigue enseñando a como ser mejor persona.

A todos ustedes y a los que me faltó nombrar (y vaya que son muchos), les digo ¡Gracias!
“Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes”.

Jhandry Fernando Sotomayor Japón

Índice de contenidos

Portada	i
Certificado	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xii
Índice de anexos	xiv
Índice de acrónimos.....	xiv
1 Título	1
2 Resumen	2
ABSTRACT	3
3 Introducción	4
4 marco teórico	5
4.1 SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN	5
4.1.1 <i>Sistemas de presión</i>	5
4.1.1.1 Definición.....	5
4.1.1.2 Medición de sistemas de Presión	5
4.1.2 <i>Sensores de presión</i>	5
4.1.3 <i>Sistemas de control de presión</i>	6
4.1.3.1 Tipos de sistemas de control de presión	7
4.1.3.2 Componentes de un sistema de control de presión	8

4.1.4	<i>Banco de pruebas de sistema de control de presión</i>	9
4.1.4.1	Sistema Didáctico de Control de Presión en Arquitectura Abierta	10
4.1.4.2	Sistema Regulador de Presión	11
4.2	SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE.....	12
4.2.1	<i>Sistema de Control</i>	12
4.2.1.1	Clasificación de los sistemas de Control	13
4.2.1.1.1	Sistema de control de lazo abierto	13
4.2.1.1.2	Sistema de control de lazo cerrado	13
4.2.2	<i>Sistema de control inteligente</i>	13
4.2.3	<i>Sistema de control borroso</i>	15
4.2.3.1	Definición de lógica borrosa	15
4.2.3.2	Introducción a lógica borrosa	15
4.2.3.3	Conjuntos Borrosos	16
4.2.3.4	Funciones de Inclusión de conjuntos borrosos	17
4.2.3.4.1	Función de pertenencia tipo trapezoidal.....	17
4.2.3.4.2	Función de pertenencia tipo singleton	18
4.2.3.4.3	Función de pertenencia tipo T (triangular)	18
4.2.3.4.4	Función de pertenencia tipo S	19
4.2.3.4.5	Función de pertenencia tipo π	20
4.2.3.5	Variable Lingüística	21
4.2.3.6	Particiones Borrosas.....	22
4.2.3.7	Medidas Borrosas.....	22
4.2.3.8	Operaciones Borrosas.....	23
4.2.3.9	Inferencia Borrosa.....	23
4.2.3.9.1	Principio de extensión... ..	24
4.2.3.9.2	Relación borrosa.....	24

4.2.3.9.3	Implicación borrosa	24
4.2.3.10	Reglas Borrosas.....	25
4.2.3.11	Fuzificador	26
4.2.3.11.1	Fuzificador singleton	26
4.2.3.11.2	Fuzificador no singleton	26
4.2.3.12	Defuzificador.....	26
4.2.3.12.1	Defuzificador por máximo.....	26
4.2.3.12.2	Defuzificador por media de centros.....	26
4.2.3.12.3	Defuzificador por centro de área.....	27
4.2.3.13	Sistema de control Difuso	27
4.2.4	<i>Redes Neuronales</i>	29
4.2.5	<i>Trabajos relacionados (aplicación de control inteligente a control de presión) Sistema de control borroso</i>	29
4.3	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	30
4.3.1	<i>Modelado analítico</i>	30
4.3.2	<i>Modelado matemático mediante identificación experimental de sistemas</i>	31
4.4	DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL ASISTIDO POR COMPUTADOR	33
4.4.1	<i>LabVIEW</i>	33
4.4.2	<i>MATLAB®</i>	33
4.4.3	<i>Herramienta computacional para la adquisición de datos (App de LabVIEW)</i>	33
4.4.4	<i>Herramienta computacional para la identificación de sistemas (App de MATLAB) ®</i>	34
4.4.5	<i>Herramienta computacional para el diseño de controladores convencionales (App de MATLAB) ®</i>	36
4.4.6	<i>Herramienta computacional para el diseño de sistemas de control difuso (App de MATLAB) ®</i>	37
5	Metodología	39
5.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	39
5.2	MATERIALES Y EQUIPO	39
5.3	MÉTODOS	40
5.4	ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA PLANTA	41
5.4.1	<i>Verificación de estado, conexión de la Planta</i>	41
5.4.2	<i>Adquisición de Datos</i>	45

5.5 OBTENCIÓN DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA	45
5.5.1 <i>Identificación experimental de Sistemas usando el software MATLAB®</i>	45
5.6 OBTENCIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO	53
5.6.1 <i>Diseño del Sistema de control borroso</i>	53
5.7 SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO	63
6 Resultados	67
6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	67
6.2 MODELO MATEMÁTICO.....	67
6.3 CONTROLADOR DIFUSO	68
6.4 COMPARACIÓN ENTRE CONTROL INTELIGENTE Y CONTROL CONVENCIONAL	69
7 Discusión	74
8 Conclusiones	76
9 Recomendaciones	77
10 Bibliografía	78
11 Anexos	81

Índice de tablas:

Tabla 1. Tipos de sensores de presión	5
Tabla 2. Componentes del sistema de Control de Presión.....	8
Tabla 3. Cuadro comparativo de Técnicas de control inteligente.....	13
Tabla 4. Conorma y Norma de las condiciones	23
Tabla 5. Operaciones entre conjuntos borrosos	23
Tabla 6. Metodología modelado matemático.....	31
Tabla 7. Materiales y Equipos	39
Tabla 8. Resumen de datos de experimentos	49
Tabla 9. Resumen de <i>Poles</i> y <i>Zeros</i>	53
Tabla 10. Variables de entrada y salida del controlador difuso	54
Tabla 11. Funciones de pertenencia para la presión	56
Tabla 12. Funciones de pertenencia para la variable cambio de error	57
Tabla 13. Coordenadas de las funciones de pertenencia para la variable corriente de salida	58
Tabla 14. Combinaciones de las reglas difusas	58
Tabla 15. Comparación de respuesta de señales de controlador PI y Difuso	71
Tabla 16. Comparación de desempeño de controladores frente a altos y bajos de presión.	73

Índice de figuras:

Figura 1. Sistema de Control de Presión.	7
Figura 2. Sistema de control de Presión a válvula cerrada	7
Figura 3. Esquema del banco de pruebas.....	9
Figura 4. Sistema Didáctico de Control de Presión en Arquitectura Abierta	11
Figura 5. Sistema Regulador de Presión.....	12
Figura 6. Representación del sistema con la interacción de la entrada al proceso	12
Figura 7. Ejemplo de representación de conjuntos borrosos para la variable estatura	16
Figura 8. Términos relativos a los conjuntos borrosos.	16
Figura 9. Función de pertenencia de tipo trapezoidal.....	17
Figura 10. Función de tipo singleton	18
Figura 11. Función de tipo T triangular.....	18
Figura 12. Función de tipo S	20
Figura 13. Función de pertenencia del tipo pi con forma de campana	20
Figura 14. Control Directo de un proceso	28
Figura 15. Estructura de un controlador (FLC es el controlador borroso)	28
Figura 16. Estructura de un controlador borroso o FLC.....	29
Figura 17. Proceso de identificación de un sistema.....	31
Figura 18. Diagrama de flujo de modelado matemático en identificación de sistemas.....	32
Figura 19. Ventana de System Identification	36
Figura 20. <i>Fuzzy Logic Designer</i>	37
Figura 21. <i>Rule Editor</i>	38
Figura 22. Ubicación del área de estudio.....	39
Figura 23. Diagrama de flujo de fases del procedimiento del proyecto	40
Figura 24. Configuración de IP en PC y FieldPoint	42
Figura 25. Conexión entre PC y FieldPoint.....	42
Figura 26. VI de diagramas de bloques para la adquisición de datos	44
Figura 27. Pantalla para la adquisición de datos.....	45
Figura 28. Ventana de la herramienta System Identification.....	46
Figura 29. Import Data donde se coloca las variables	46
Figura 30. Proceso de estimación de modelo de transferencia	47
Figura 31. Graficas de los modelos de transferencia	48
Figura 32. <i>Poles and Zeros</i> del modelo de transferencia.....	48
Figura 33. Diagrama de Bloques para la planta con variables de entrada y salida.....	54
Figura 34. Editor <i>FIS</i> para el diseño del controlador, entrada el valor de error de Presión y comparador de error, salida corriente de válvula proporcional.....	55

Figura 35. Funciones de pertenencia en base a la variable comparador de error	56
Figura 36. Funciones de inferencia para el cambio de error.....	57
Figura 37. Funciones de inferencia para la salida, corriente de salida	58
Figura 38. Reglas Difusas para el controlador.....	59
Figura 39. Curva de control de las variables	59
Figura 40. Reglas difusas con el método <i>Mamdani</i>	60
Figura 41. Diagrama de bloques implementando la función de transferencia y el controlador difuso	61
Figura 42. Configuración de <i>STEP</i>	62
Figura 43. Configuración del bloque de controlador difuso.....	62
Figura 44. Configuración de la función de transferencia.....	63
Figura 45. Sistema de control difuso simulado	64
Figura 46. Sistemas de control inteligente y convencional PI.....	64
Figura 47. Sistema de control Difuso y Convencional PI al tener perturbaciones	65
Figura 48. Sistema de control Difuso y convencional Pi ante saltos o bajos de presión.....	66
Figura 49. Sistema de control Difuso y convencional Pi ante salto de presión y perturbaciones ...	66
Figura 50. Datos tomados del transductor de presión y de la válvula proporcional	67
Figura 51. Ecuación del modelo de transferencia.....	68
Figura 52. Respuesta del controlador ante un <i>SETPOINT</i>	69
Figura 53. Sistemas de control inteligente y convencional PI.....	70
Figura 54. Comparación de salidas graficas de controladores.....	70
Figura 55. Representación gráfica de respuestas de controladores ante perturbaciones	71
Figura 56. Representación gráfica de respuestas de controladores ante subida y bajo de presión. .	72
Figura 57. Representación gráfica de respuestas de controladores ante subida presión y perturbaciones	73
Tabla 3. Cuadro comparativo de Técnicas de control inteligente	

Índice de anexos:

Anexo 1. Ensayo de medición 1	81
Anexo 2. Ensayo de medición 2	81
Anexo 3. Ensayo de medición 3	82
Anexo 4. Ensayo de medición 4	82
Anexo 5. Ensayo de medición 5	83
Anexo 6. Ensayo de medición 6	83
Anexo 7. Ensayo de medición 7	84
Anexo 8. Ensayo de medición 8	84
Anexo 9. Ensayo de medición 9	85
Anexo 10. Diagrama de control Difuso.....	85
Anexo 11. Grafica de Controlador Difuso.....	86
Anexo 12. Diagrama de control Difuso y Pi	86
Anexo 13. Grafica de Controlador Difuso y PI.....	87

Acrónimos:

IOT: Internet de las cosas

FAM: Memoria asociativa borrosa

FLC: Controladores de lógica difusa

MPC: Control predictivo basado en modelo

VI: Instrumento Virtual

IO Point: Archivo de dato

FIS: sistemas de inferencia borrosa

Título

Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de Automatización.

Resumen

El presente trabajo de Integración Curricular abarca el diseño de un sistema de control inteligente para el banco de medición y control de presión ubicado en el laboratorio de automatización industrial de la facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.

Como primer punto del trabajo se realiza la búsqueda y revisión bibliográfica, correspondiente a los temas de Identificación experimental de sistemas dinámicos, sistema de control inteligente difuso, manual de uso del banco de presión, herramientas de MATLAB® en diseño y simulación de sistemas de control. Posteriormente, se realiza el procedimiento de identificación experimental de sistemas para obtener un modelo matemático que represente adecuadamente la dinámica del sistema. Se busca un modelo con un porcentaje de ajuste $>80\%$. Para ello, se establece la comunicación entre el banco y el ordenador mediante un cable Ethernet para la adquisición y control de datos. Después, se utilizan módulos FieldPoint 2010 para la adquisición y control de señales en tiempo real en aplicaciones de control como es el software LabVIEW 2011, por ende, se realizan ensayos bajo mismas condiciones por igual. Luego se utiliza el software MATLAB® para llevar a cabo la identificación experimental de sistemas mediante System Identification, utilizando los datos obtenidos para crear varios modelos del sistema y por medio del método de Zeros and Poles y el porcentaje de ajuste se escoge el que mejor represente la planta.

Para el proceso de diseño del controlador Difuso se realiza por medio de herramientas como Fuzzy Logic Toolbox y Simulink de MATLAB®, se crea el sistema de control de la planta el que va a representar el modelo matemático, en el controlador se toma en cuenta variables de entrada y salida, realizando una base de reglas difusas que relacionen las variables, así mismo se lo añade al sistema de control realizado para efectuar la simulación. Se realizan pruebas de perturbación, sonido y variaciones en el setpoint en la simulación para la evidenciar el comportamiento y desempeño que va a ejercer el controlador difuso.

Finalmente se realiza una comparación mediante simulación del desempeño del controlador difuso frente a controladores convencionales, las simulaciones muestran las curvas, saltos, tiempos de estabilización a fin de verificar el controlador óptimo que ejerce su trabajo mejor.

Palabras clave: Banco de Presión, Sistema de Control Inteligente Difuso, Herramientas de MATLAB®, identificación de sistemas, modelo matemático.

Abstract.

This curriculum integration work covers the design of an intelligent control system for the pressure measurement and control bench located in the industrial automation laboratory of the Faculty of Energy, Industries and Non-Renewable Natural Resources.

As a first point of the work, a bibliographic search and review is performed, corresponding to the topics of experimental identification of dynamic systems, fuzzy intelligent control system, manual of use of the pressure bench, MATLAB® tools in design and simulation of control systems. Subsequently, the procedure of experimental identification of systems is performed to obtain a mathematical model that adequately represents the dynamics of the system. A model with a fit percentage >80% is sought. For this purpose, communication between the bench and the computer is established by means of an Ethernet cable for data acquisition and control. Then, FieldPoint 2010 modules are used for the acquisition and control of signals in real time in control applications such as LabVIEW 2011 software, thus, tests are performed under the same conditions equally. Later MATLAB® software is used to carry out the experimental identification of systems through System Identification, using the data obtained to create several models of the system and by means of the method of Zeros and Poles and the percentage of adjustment, the one that best represents the plant is chosen.

For the design process of the Fuzzy controller is performed by means of tools such as Fuzzy Logic Toolbox and Simulink of MATLAB®, the control system of the plant is created which will represent the mathematical model, in the controller input and output variables are taken into account, making a fuzzy rule base that relates the variables, likewise it is added to the control system made to perform the simulation. Tests of disturbance, sound and variations in the setpoint in the simulation are performed to demonstrate the behavior and performance that will exercise the fuzzy controller. Finally, a comparison is made by simulation of the performance of the fuzzy controller versus conventional controllers, the simulations show the curves, jumps, stabilization times in order to verify the optimal controller that performs its work better.

Keywords: *Pressure Bench, Fuzzy Intelligent Control System, MATLAB® tools, system identification, mathematical model.*

Introducción

En los últimos años, el sector industrial automatizado experimenta cambios constantes que van más allá de la innovación tecnológica y afectan el ámbito social, laboral y educativo. Estos cambios impulsan la mejora continua de los procesos en sistemas automatizados.

La rama del control automático incluye diferentes tipos de controladores que permiten regular mecanismos, manipulando variables como velocidad, presión, temperatura, entre otras. La necesidad de innovación y mejora de los controladores ha llevado a la implementación de nuevos y óptimos sistemas de control, como los sistemas expertos, controladores inteligentes y modernos, y técnicas de inteligencia artificial como las Redes Neuronales y el Control Difuso, o una combinación de ambas neuro difuso, que por sus capacidades de afrontar necesidades en muchos campos son muy utilizados.

El control inteligente es una serie de técnicas obtenidas de la inteligencia artificial, que buscan resolver problemas de control inabordables por los métodos clásicos (Sanz, 1990). El uso de bancos de pruebas es fundamental para el estudio y experimentación, permitiendo comprobar lo que se pretende analizar, como perturbaciones o variables como presión, temperatura, entre otras. En el laboratorio de Automatización de la Universidad Nacional de Loja (U.N.L.), se cuenta con un banco de experimentación con un controlador convencional PI para realizar ensayos de control y medición de presión.

Siguiendo con lo mencionado anteriormente, el presente trabajo propone el estudio de lógica difusa y el control difuso, muy utilizado en la solución de necesidades que utilicen control automático, para elaborar un sistema de control inteligente difuso que sea simulado y realizar pruebas ante diferentes situaciones, permitiendo una nueva rama de investigación de control inteligente en diferentes tipos de sistemas que existen.

En base a lo expuesto, para lograr la resolución de la investigación se ha planteado los siguientes objetivos:

Objetivo general

Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de automatización industrial.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo matemático para el banco de presión del laboratorio de automatización mediante la identificación de sistemas.
- Diseñar un controlador inteligente para el banco de presión basado en el modelo desarrollado
- Verificar mediante la simulación el desempeño del controlador inteligente diseñado.

4 Marco Teórico

4.1 Sistema de Control de presión

4.1.1 *Sistemas de presión*

4.1.1.1 Definición

Los sistemas de presión son los encargados de manipular la presión que circula en las tuberías o en un tanque de almacenamiento, el sistema está predispuesto que, a una solicitud de una presión establecida, se arranca y se regula la presión por medio de elementos de manipulación, de esta forma se obtiene la presión a una demanda, pueden ser usados para aumentar presión en casas, edificios, restaurantes, industria, etc. (Vimatec, 2019).

4.1.1.2 Medición de sistemas de Presión

La presión es una fuerza ejercida sobre una superficie es medida por barómetros, manómetros y el vacuómetro, la presión del gas se abate a lo largo el tubo debido a la presión, es así que se utilizan instrumentos de medición de presión donde convierten en una señal electrónica

4.1.2 *Sensores de presión*

Los sensores de presión permiten la adquisición de la información para el controlador, existen diversos tipos los cuales se resumen en la siguiente tabla. La autoreferencia al marcador no es válida.. Tipos de sensores de presión.

Tabla 1. Tipos de sensores de presión

Tipos	Sensores
Sensores Mecánicos	- Manómetro Aparato que sirve en la medición de presión en fluidos en un sistema cerrado, miden la presión relativa a la atmosférica.
	- Barómetro Básicamente es un manómetro diseñado para medir la presión atmosférica.
	- Manómetro tipo U Consiste en un tubo que tiene forma de U, mide la diferencia en el nivel del líquido de las dos ramas.
	- Tubo de Bourdon

Tipos	Sensores
Sensores Elásticos	<p>Consiste en un tubo de sección Elíptica que forma un anillo casi completo, está cerrado por un extremo, se aumenta la presión este tiende a enderezarse y el movimiento lo transmite con una aguja.</p>
	<p>- Diafragma</p> <p>Consiste en una lámina fina de metal, cuando recibe presión esta se deforma y dando pequeños desplazamientos.</p>
	<p>- Fuelle</p> <p>Este sensor puede ser de acero inoxidable, latón o bronce, al aumentar la presión este fuelle se expande, la cantidad de expansión es proporcional.</p>
Sensores Electromecánicos	<p>- Película delgada</p> <p>Fabricados con una base de acero inoxidable, el circuito eléctrico está en la superficie de la membrana, alto campo de aplicación en presiones medias y altas.</p>
	<p>- Película Gruesa</p> <p>Compuestos de una parte de cerámica debido por los circuitos, tienen el campo de aplicación limitado, resistencias, conectores de membrana, cuerpo cerámico.</p>
	<p>- Sensor Piezorresistivo</p> <p>Elemento de medición, consta de un puente <i>Wheatstone</i> con base de silicio, se extiende mínimamente bajo presión cambiando la resistencia eléctrica de esta manera este efecto se conoce como Piezorresistivo</p>

4.1.3 Sistemas de control de presión

El control de presión permite un fácil diseño y optimización para distintos usos o necesidades que se requiera, todo sistema de presión está compuesto por elementos de control, se considera un ejemplo en el cual consta con una presión de entrada que se va a controlar , se puede detallar un punto de prueba de presión para la detección, monitoreo y control de presión así mismo pasa a un depósito que está conectado a un sensor de presión manométrica,

existe una válvula de salida que purga el aire cuando detecte que si existe mucho aire en el tanque de almacenamiento como se observa en la **Figura 1**.

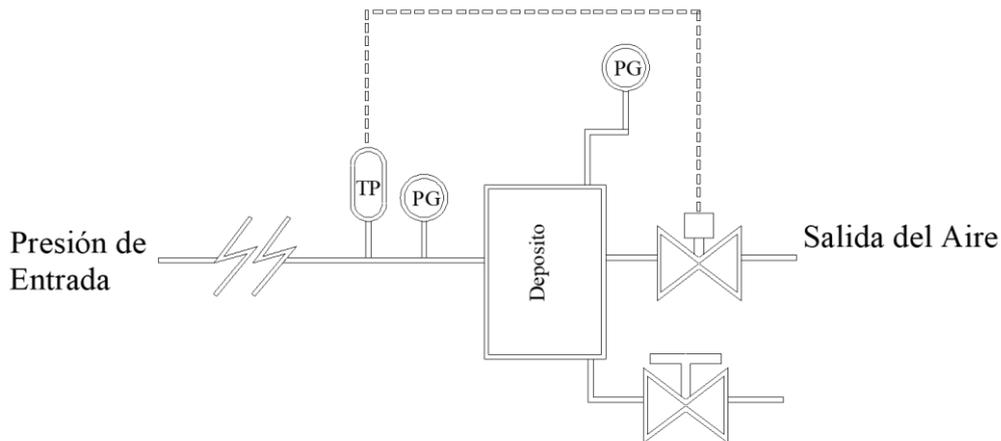


Figura 1. Sistema de Control de Presión.

4.1.3.1 Tipos de sistemas de control de presión

Se consideran distintos tipos de sistemas de control de presión, como es el caso de control de presión válvula abierta y cerrada.

- Sistema de control de presión válvula abierta

El sistema de control a válvula abierta se puede encontrar en la **Figura 1**. Sistema de Control de Presión.

- Sistema de control de presión válvula cerrada

El sistema de control a válvula cerrada es caracterizado ya que al cerrar la válvula la presión en la línea se incrementa hasta alcanzar la presión de entrada, como se observa en la **Figura 2** (Villanueva, Rubío Gonzales, Salvador, & Guinea, 2014).

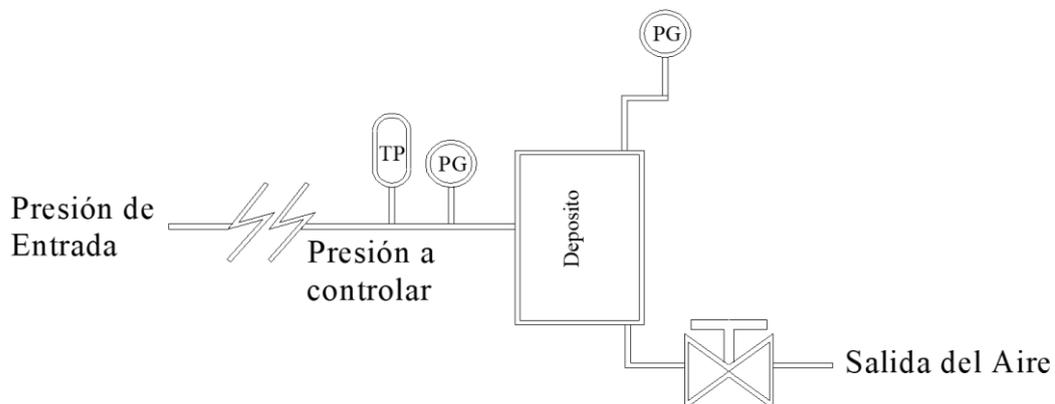


Figura 2. Sistema de control de Presión a válvula cerrada

Fuente: (Villanueva, Rubío Gonzales, Salvador, & Guinea, 2014)

4.1.3.2 Componentes de un sistema de control de presión.

Los sistemas de presión están compuestos por diversos grupos de elementos como se observa en la siguiente **Tabla 2**.

Tabla 2. Componentes del sistema de Control de Presión

Grupo de Elementos	
Abastecimiento de energía	Compresor
Unidad de mantenimiento	Filtro de Aire
	Regulador de aire
	Manómetro indicador de presión
Control de la Planta	Válvulas de control
	Válvulas de accionamiento manual
	Válvulas de accionamiento eléctrico
	Válvulas reguladoras
	Válvula Proporcional reguladora de presión
Elementos de medición de presión	Manómetro
	Sensor de Presión
	Controlador

4.1.4 Banco de prueba de sistema de control de presión

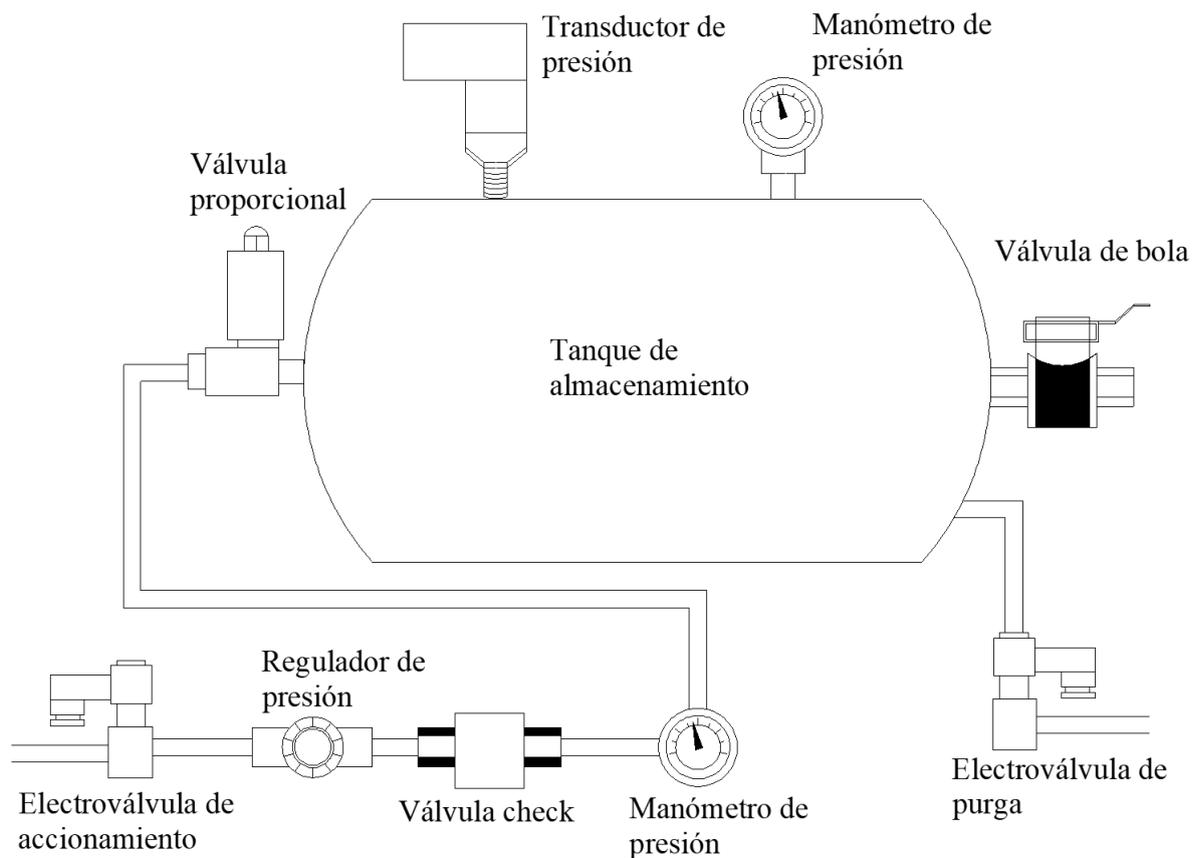


Figura 3. Esquema del banco de pruebas.

El laboratorio de Automatización de la U.N.L. dispone de un banco para la medición y control de presión, su esquema representativo se muestra en la **Figura 3**, fue diseñado y construido en el año 2014 (Tandazo Solano, 2014), así mismo se realizó una investigación con un controlador predictivo basado en modelo (Ramos Moreno, 2015), consta con los siguientes elementos y accesorios:

- Electroválvula de accionamiento
- Electroválvula de Purga
- Regulador de Presión SMC
- Válvula antirretorno
- Manómetros de presión de entrada
- Válvula proporcional analógica OMEGA
- Acumulador

- Válvula manual
- Sensor de presión analógico
- Controlador lógico programable

El principio de funcionamiento de la planta es el mantener un nivel constante de presión en el sistema, este sistema opera mediante interacción coordinada de sus componentes, para ello primeramente se conecta la red eléctrica con módulos Field Point 2010 para la adquisición de datos y el control distribuido, así mismo se comunica a un computador a través de un cable *Ethernet* UTP cat.6, además del uso de un compresor de aire cargado que suministra aire conectado a la válvula de accionamiento donde es la entrada de presión.

Al energizar la válvula de accionamiento permite; el paso de aire a un regulador de presión el cual regula su paso hacia los demás elementos, se utiliza una válvula antirretorno para evitar que el aire no se regrese. Antes del ingreso al tanque de almacenamiento se encuentra una válvula proporcional que es activada desde el computador para permitir el paso aire, se toma en cuenta la capacidad máxima del tanque para evitar accidentes, no que superar la cifra de 15 PSI para ello se comprueba la presión usando manómetros de presión que ayudan a visualizar la presión ejercida ubicado en el tanque. A la salida del tanque se encuentra una válvula de salida permite evacuar el aire comprimido dando una variación de presión.

Para la adquisición de datos de presión se utiliza un transductor de presión conectado al tanque de almacenamiento el cual envía los datos al computador.(Ramos Moreno, 2015).

4.1.4.1 Sistema Didáctico de Control de Presión en Arquitectura Abierta

En la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima cuenta con un banco de presión Didáctico que se muestra en la **Figura 4** el cual consta de dos tanques de capacidad de 13 Kg/cm² , una válvula para la simulación de consumo en un proceso continuo, una vez energizado el sistema se conecta a un compresor a la válvula 1, la válvula 3 que es de desfogue debe estar cerrada, así mismo las válvulas 2, 4, 5 y 6, respectivamente deben estar abiertas para alimentar a los tanques, un transmisor enviará la señal de corriente proporcional a la presión del sistema al controlador, el cual realiza una comparación para enviar una corrección a la válvula de control, así se ha implementado un controlador digital programable en el cual se ha instalado en el tablero de conexiones el cual alberga los datos

tomados y envía señales a la válvula de control para realizar el proceso de ensayos. (Saida M. Charre-Ibarra, 2014)

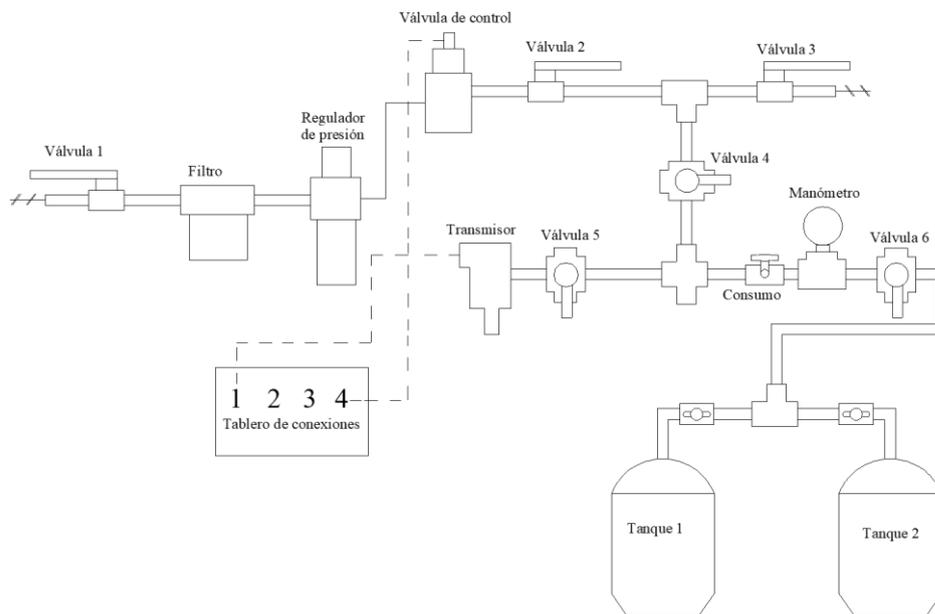


Figura 4. Sistema Didáctico de Control de Presión en Arquitectura Abierta

Fuente: (Saida M. Charre-Ibarra, 2014)

4.1.4.2 Sistema Regulador de Presión

En el Departamento de Electrónica y Automatización de la Universidad Autónoma de Manizales se encuentra un mecanismo regulador de presión el cual está monitoreado y controlado con tecnología IOT se muestra en la Figura 5, el mismo que cuenta con un compresor que se encarga de proporcionar el aire al sistema, dos acumuladores de capacidad de 200 PSI, dos transductores de presión, dos indicadores de presión de 0 – 100 PSI, cinco válvulas manuales para la configuración en serie y paralelo y la simulación de perturbaciones, anexo al sistema de control lógico programable para la manipulación de la válvula de control en la realización de ensayos y pruebas de medición de presión usando el sistema de control que va a monitorear (Rodríguez Sote, 2017).

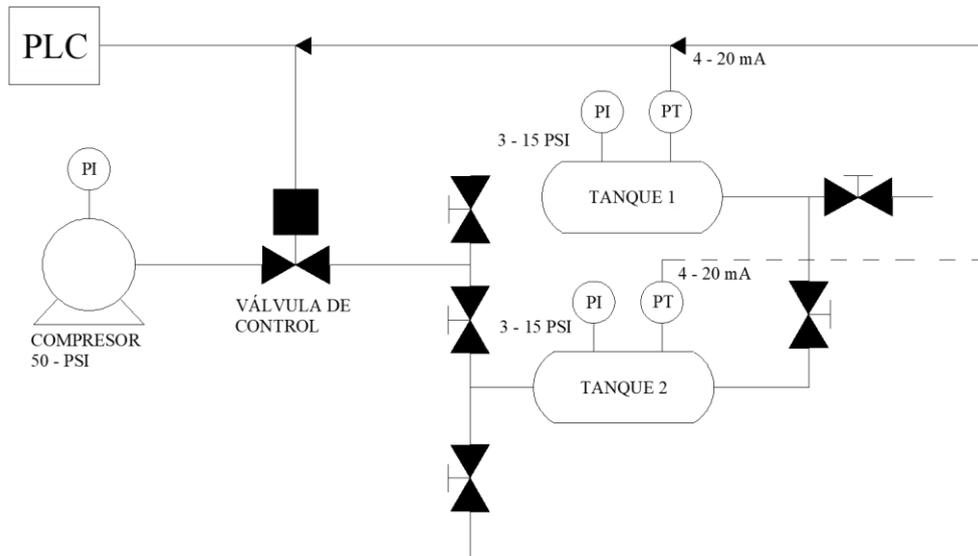


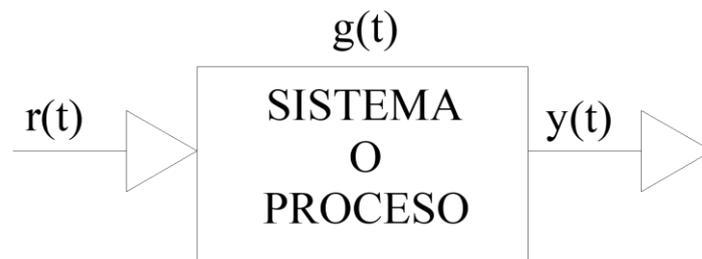
Figura 5. Sistema Regulator de Presión

Fuente: (Rodríguez Sote, 2017)

4.2 Sistema de Control Inteligente

4.2.1 Sistema de Control

Los sistemas de control son muy importantes en diversos campos de aplicación, cumplen necesidades en donde utilizan estrategias de control, un sistema es la interconexión de elementos que agrupan un sistema $g(t)$, este arreglo es capaz de tener control por sí mismo. Este sistema se le aplica una señal $r(t)$ a manera que sirva de entrada para obtener una respuesta o salida $y(t)$. Así se lo puede observar en la **Figura 6**. Representación del sistema con la interacción de la entrada al proceso (Gaviño, 2010).



$r(t)$ = entrada

$g(t)$ = sistema

$y(t)$ = salida

Figura 6. Representación del sistema con la interacción de la entrada al proceso

Fuente:(Gaviño, 2010)

4.2.1.1 Clasificación de los sistemas de Control

4.2.1.1.1 Sistema de control de lazo abierto

Caracterizados debido que su salida no influye en la entrada del sistema, no existe retroalimentación, son vulnerables ante perturbaciones, la precisión además depende de la calibración de los elementos.

4.2.1.1.2 Sistema de control de lazo cerrado

Este tipo de sistemas son retroalimentados, la señal de salida del sistema se alimenta al controlador, influye en la acción del control, se compara la señal referencia y permite una aproximación al valor deseado.

4.2.2 Sistemas de control inteligente

El control inteligente es un método de control que tiene una semejanza a la inteligencia humana en ámbitos de aprendizaje, al tomar una decisión y en la resolución de problemas, es un procedimiento computacional eficiente de dirigir un sistema complejo a un objetivo, comprende el resultado de la unión entre el control automático y la inteligencia artificial, emula las funciones de un ser vivo en cuanto a las facultades mentales como percibir, entender y elegir razonablemente de manera satisfactoria bajo circunstancias.

Existen varios enfoques o técnicas de lo que es la inteligencia artificial como el caso de las redes neuronales, lógica difusa o borrosa, sistemas expertos, algoritmos genéticos y redes Petri, estas técnicas cada vez se van actualizando y además se crean nuevos métodos de control **Tabla 3.** (Rubio Mora & Guerrero Bayona, 2016).

Tabla 3. Cuadro comparativo de Técnicas de control inteligente

Técnica	Concepto/Definición	Variable de uso frecuente	Sistema que se puede emplear
Lógica Difusa	Esta técnica representa el conocimiento común, de tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, un lenguaje matemático que va a través de la teoría de conjuntos difusos y algunas funciones que van asociadas a ellos	Temperatura, Presión, Velocidad, distancias, ángulos y posición	- Sistema de Control de Presión de una Caldera Piro-tubular - Estación de presión para prácticas de control de procesos - Sistema llenado de Líquidos
Redes Neuronales	Las redes neuronales simulan características de razonamiento humano como capacidad de memorizar y asociar hechos,	Presión, Luz, Temperatura o cualquier otra variable que el	- Estimación de fugas en tuberías a presión (Ladino Moreno, García Ubaque, & García Vaca, 2021)

Técnica	Concepto/Definición	Variable de uso frecuente	Sistema que se puede emplear
	aqueellos hechos o problemas no pueden expresarse en un algoritmo, todos aquellos tienen algo en común que es la experiencia, como el ser humano puede resolver situaciones a partir de la experiencia obtenida.	sensor pueda detectar.	- Predicción de presión de miscibilidad en la inyección de Dióxido de Carbono Plantas Piloto de desinfección de aguas terciarias usando tecnología porosa - Predicción del caudal volumétrico utilizando redes neuronales (Aranda Arizmendi, 2018).
Sistema Neuro difuso	Combinas técnicas de redes neuronales y lógica difusa para el diseño de sistemas de control adaptativos y robustos. Se utiliza para mejorar sistemas complejos y no lineales.	Temperatura, velocidad, humedad, luminosidad y presión	- Control de procesos en plantas de fabricación, control de temperatura, humedad y calidad del aire en edificios, control de sistemas de detección de intrusos, sistemas de vigilancia.
Sistemas Expertos	Los sistemas expertos simulan el razonamiento de un dominio en concreto y en ocasiones son usados por estos mismos, buscan mejor calidad y rapidez en las respuestas así también un mejoramiento en la productividad	Presión, variables numéricas, distancia y posición	- Sistema Experto para el diagnóstico de fallos de bombas de agua de alimentar calderas Control de procesos industriales
Algoritmos Genéticos	Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que resuelven problemas de búsqueda y optimización, se basan en un proceso genético de organismos, capaces de crear soluciones hacia los valores óptimos de un problema que depende de una buena medida y de la codificación de información.	Valores de un individuo, variables numéricas	- Algoritmo genético para la sintonización de una estructura de control MPC aplicado a una planta de presión. (Ramírez Urrego, 2015).

Técnica	Concepto/Definición	Variable de uso frecuente	Sistema que se puede emplear
Redes Petri	Las redes Petri se describen como una herramienta de naturaleza gráfica para el diseño y análisis de sistemas dinámicos de eventos discretos, se puede representar gráficamente por un grafo dirigido bipartito, los dos tipos de nodos, lugares y transiciones representan, las variables que definen el estado del sistema y sus transformadores	Variables que puedan medir un sensor, valores numéricos y booleanas.	<ul style="list-style-type: none"> - Redes Petri interpretadas en el diagnóstico de fallos de sistemas Híbridos - Modelado e implementación de un sistema automático de detección y diagnóstico de fallas basado en redes Petri para el proceso hogar en la generación de vapor.

Fuente: (Rubio Mora & Guerrero Bayona, 2016)

4.2.3 Sistema de control borroso

4.2.3.1 Definición de lógica borrosa

La lógica borrosa trata de información que no es precisa, datos como estatura, temperatura fuerza, en términos como media, baja, poca o mucha, usando en conjuntos borrosos o difusos usando un conjunto de reglas para realizar una acción (Martín del Brío & Sanz Molina, 2001).

4.2.3.2 Introducción a lógica borrosa

La teoría de conjuntos borrosos inicia en la teoría de conjuntos clásica, es así como añade una función de pertenencia a un conjunto, definida con un valor numérico real entre 0 y 1, es así que para cada conjunto borroso se va definiendo una función de pertenencia o inclusión $\mu_A(t)$, indica el grado en que la variable t , en la etiqueta A . La lógica borrosa comprende valores lingüísticos como bastante, casi, poco, algo, etc., como se lo puede observar en la **Figura 7**.

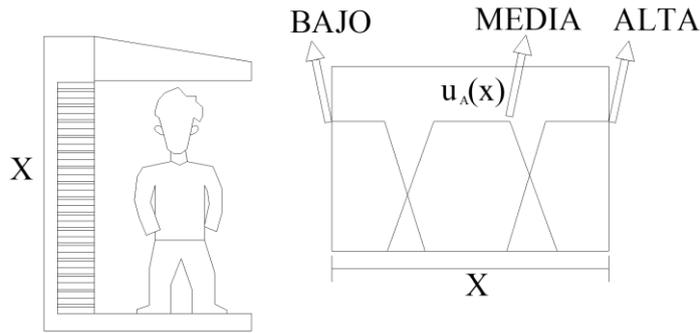


Figura 7. Ejemplo de representación de conjuntos borrosos para la variable estatura
4.2.3.3 Conjuntos Borrosos

En términos matemáticos se denomina un conjunto borroso U (conjunto de objetos denominado universo de discurso) caracterizado por una función de inclusión μ_F que adquiere valores en un rango $[0,1]$, donde $\mu_F(u)$ representa el grado en el que $u \in U$ pertenece al conjunto borroso F , el concepto clásico de un conjunto es que la función de pertenencia toma solamente los valores 0 o 1; para uno borroso, la función puede tomar también valores intermedios.

Un conjunto borroso F , el conjunto soportado es el conjunto clásico de los valores de U para que $\mu_F(u) > 0$. Los puntos de cruce son valores pequeños los que $\mu_F(u) = 0,5$. Un conjunto borroso es de tipo singleton si su conjunto soportado es de un solo valor como se puede observar en la **Figura 8**.

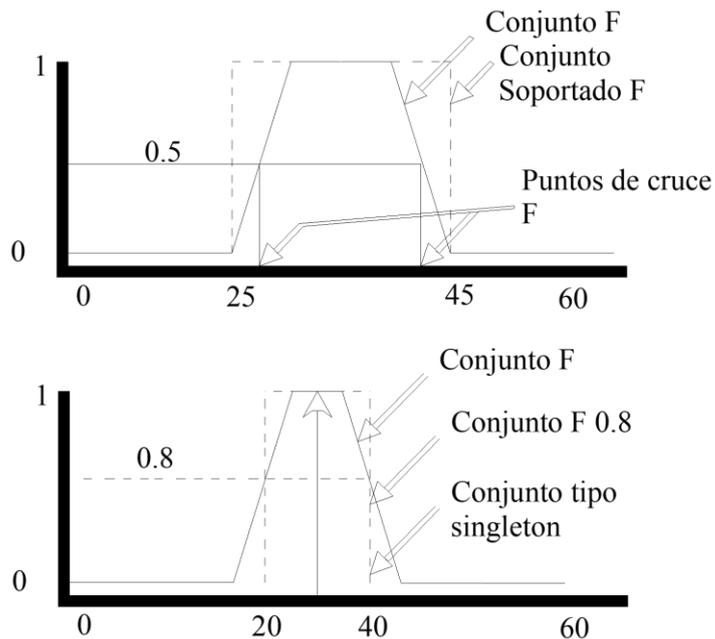


Figura 8. Términos relativos a los conjuntos borrosos.

Fuente: (Martín del Brío & Sanz Molina, 2001)

Se denomina conjunto α -corte F de un conjunto borroso F , al conjunto clásico de todos los puntos u de U para los que se cumple $\mu_F(u) > \alpha$. Se dice que un conjunto borroso está normalizado si el máximo de su función de inclusión es 1, un conjunto borroso puede normalizarse multiplicando su función de inclusión por un coeficiente fijo para que sea de tipo normalizado.

4.2.3.4 Funciones de Inclusión de conjuntos borrosos

La función de inclusión o pertenencia de un conjunto borroso es un conjunto de pares ordenados $F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U\}$ si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de $\mu_F(u)$ indica el grado en que el valor u de la variable U representado por la etiqueta F . Existen funciones de pertenencia que se utilizan convencionalmente como la función de tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial y tipo π .

4.2.1.1.1 Función de pertenencia tipo trapezoidal

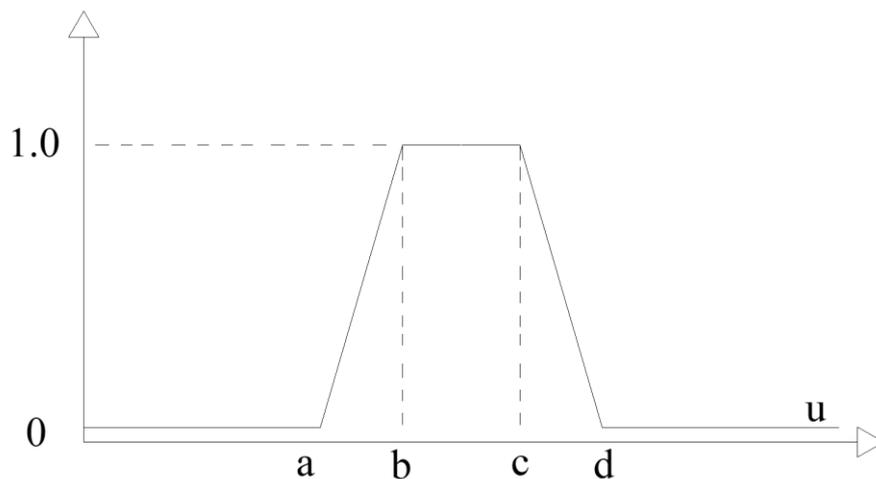


Figura 9. Función de pertenencia de tipo trapezoidal

Definida por cuatro puntos a, b, c, d , cómo se expresa en la **Figura 9**. Es 0 para valores menores de a y mayores de d , vale 1 entre b y c , toma valores $[0, 1]$ entre a y b , y entre c y d , la toma de datos se define por la variable u que es el valor que pertenece al conjunto. Se utiliza en sistemas borrosos sencillos. Se define con:

$$S(u; a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & u < a \\ \left(\frac{u-a}{b-a}\right) & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ \left(\frac{d-u}{d-c}\right) & c \leq u \leq d \\ 0 & u \leq d \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde,

- u = valor o grado que pertenece al conjunto borroso

- a, b, c, d = puntos de la función de pertenencia
- S = función

4.2.1.1.2 Función de pertenencia tipo singleton

Tiene valor 1 solo para un punto a y 0 para el resto. Utilizado en sistemas borrosos simples además requiere menos memoria para almacenar la base de reglas, se la representa como en la **Figura 10**.

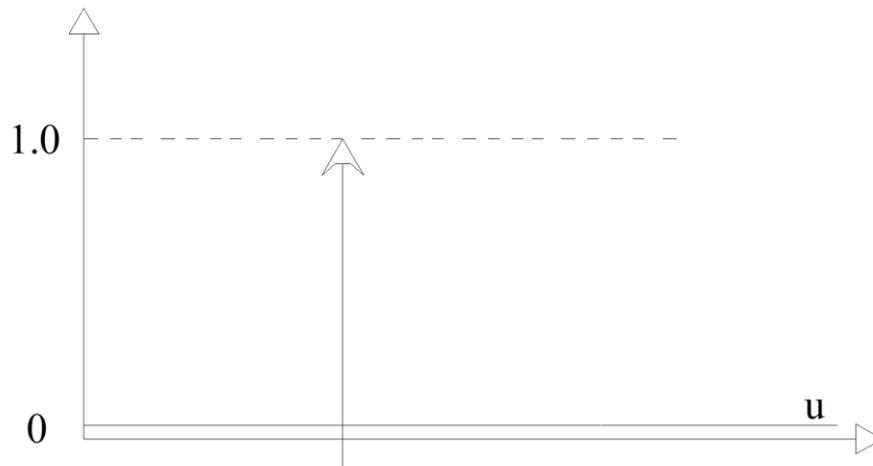


Figura 10. Función de tipo singleton

4.2.1.1.3 Función de pertenencia tipo T (triangular)

Adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de 0 para un estrecho rango de valores en a y b , se la representa en la **Figura 11**.

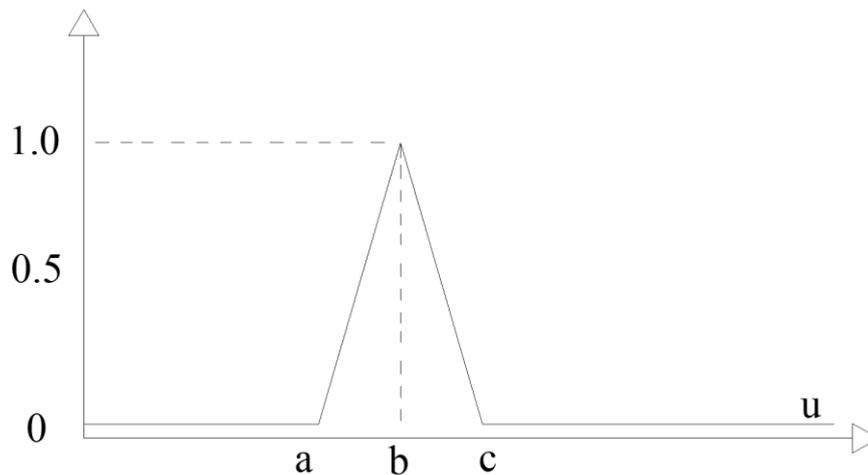


Figura 11. Función de tipo T triangular

Así mismo se define con la función:

$$S(u; a) = \begin{cases} 1 & u = a \\ 0 & u \neq a \end{cases} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$T(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b} & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde,

- S = función de pertenencia
- T = función de pertenencia
- u = valor o grado que pertenece al conjunto borroso
- a, b, c = puntos de la función de pertenencia

4.2.1.1.4 Función de pertenencia tipo S

Apropiada para el modelamiento de propiedades como grande, mucho, positivo, caracterizada por tener un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores por encima de cierto punto a , siendo 0 por debajo de a y 1 para valores mayores de c . Su punto de cruce es $b = (a + c)/2$; y entre los puntos a y c es de tipo cuadrático, como en la siguiente función exponencial:

$$S(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 2 \left(\frac{u-a}{c-a} \right)^2 & a \leq u \leq b \\ 1 - 2 \left(\frac{u-a}{c-a} \right)^2 & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde,

- S = función de pertenencia
- u = valor o grado que pertenece al conjunto borroso
- a, b, c, d = puntos de la función de pertenencia

La función tipo S gráficamente se la puede observar mediante la **Figura 12**.

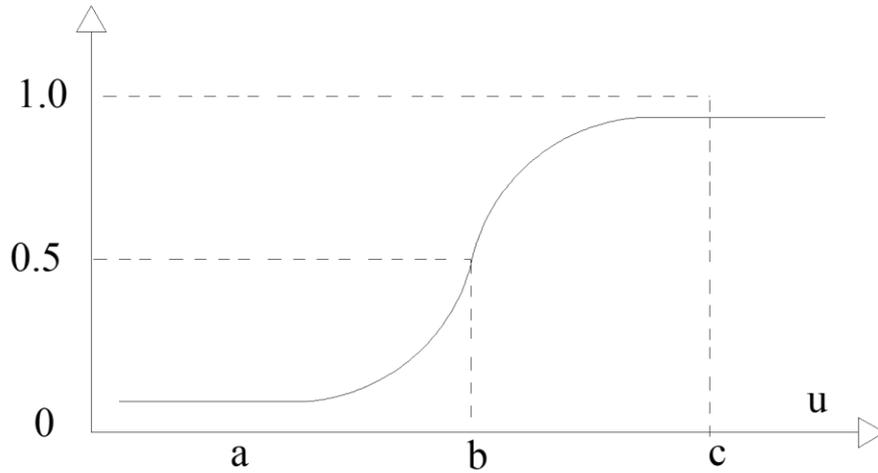


Figura 12. Función de tipo S

4.2.1.1.5 Función de pertenencia tipo π

Tiene una forma de campana, es adecuada para conjuntos en tono a un valor c , como medio, normal, cero, se definen también utilizando expresiones analíticas exponenciales o cuadráticas, como la bien conocida campana de Gauss.

Puede definirse como la siguiente forma con la siguiente ecuación (7) y **Figura 13:**

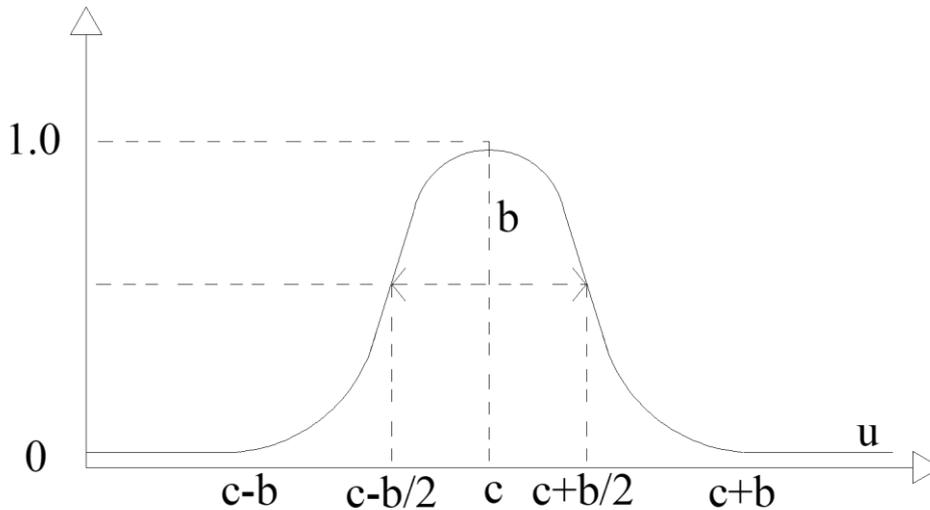


Figura 13. Función de pertenencia del tipo pi con forma de campana

$$\pi(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c - b, c - \frac{b}{2}, c) & u \leq c \\ 1 - S(u; c - b, c - \frac{b}{2}, c) & u \geq c \end{cases} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde,

- π = función de pertenencia
- u = valor o grado que pertenece al conjunto borroso
- b, c = puntos de la función de pertenencia

4.2.3.5 Variable Lingüística

La variable lingüística puede tomar valores a términos del lenguaje natural, como bastante, poco, afirmativo, negativo, las mismas desempeñan un papel de etiquetas en un conjunto borroso.

En términos formales, se define por una tupla donde A es el nombre de una variable, $T(A)$ conjunto de términos que nombran los valores numéricos que A puede tomar, valores que son conjuntos borrosos en U , conjunto de valores numéricos que puede tomar para una variable discreta p también el rango de valores posibles para una continua, G regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de x y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

A modo de ejemplo la variable de temperatura se puede considerar como una variable lingüística, de modo que $A =$ temperatura, T (temperatura) es el conjunto de todos los términos que pueden hacer referencia a la temperatura como fría, normal, alta, muy alta o también suave, agradable, fuerte, etc. El universo de discurso comprende U de esta variable.

4.2.3.6 Particiones Borrosas

Estimada una variable en este caso A , definida por un rango de valores entre u_1 y u_2 se establecen particiones, una partición es un conjunto de los conjuntos borrosos que se han definido por una variable A . Haciendo una partición de A se genera subconjuntos que pueden formarse con elementos de $T(A)$.

La partición es completa si en la misma existe un conjunto con pertenencia no nula se podría decir que todos los conjuntos definidos cubren todo U . Dos conjuntos borrosos están solapados si su intersección es no nula, solapar un conjunto borroso es la relación del número de elementos que comparte con otros conjuntos de la misma partición, respecto del número total de elementos que lo conforman.

En los controladores borrosos se recomienda que las particiones sean completas, un solapamiento del 20% a 50% además si se tratase de un número impar se pueden emplear entre 3 a 7 conjuntos, la complejidad al hacer este no es excesivo además que se brinda una precisión suficiente en la descripción de los valores de la variable.

4.2.3.7 Medidas Borrosas

Un conjunto borroso A se puede definir ciertas magnitudes medibles, estas se conocen como medidas borrosas, además una de las principales es la borrosidad, si se llama un conjunto discreto C los valores de x en los que $\mu_A(x) > 0$, la misma borrosidad indica la

distancia de A hacia el conjunto discreto C , esta magnitud borrosa mide el grado de borrosidad del conjunto.

Las distancias entre los conjuntos borrosos A y C se pueden definir utilizando diversas medidas como:

- *Hamming*

$$f(A) = \sum |\mu_A(x) - \mu_C(c)| \quad \text{Ecuación (8)}$$

- *Euclídea*

$$f(A) = \left(\sum (\mu_A(x) - \mu_C(c))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

- *Mikoswki*

$$f(A) = \left(\sum (\mu_A(x) - \mu_C(c))^w \right)^{\frac{1}{w}} \text{ con } w \in [1, \infty] \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde,

- $f(A)$ = función de inclusión o conjunto borroso A
- $\mu_A(x)$ = indica el grado en que la variable x , en la etiqueta A
- $\mu_C(c)$ = indica el grado en que la variable c , en la etiqueta C

El agrupamiento borroso es una técnica que se utiliza para alcanzar una determinada representación de un espacio vectorial de vectores de entrada, basándose en la medición de euclídeas entre vectores, además que se utiliza para determinar las reglas borrosas que describen un sistema desconocido o caja negra.

4.2.3.8 Operaciones Borrosas

El uso de un operador en un conjunto borroso se obtiene otro conjunto borroso, también al combinar dos o más subconjuntos mediante alguna operación, se obtiene otro conjunto.

Se pueden etiquetar los subconjuntos borrosos por A y B , asociados a una variable lingüística x , se pueden definir tres operaciones básicas entre ellas son: complemento, unión e intersección.

- Complemento

$$\mu_A(x) = -\mu_A(x) \quad \text{Ecuación (11)}$$

- Unión

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecuación (12)}$$

- Intersección

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde,

- $\mu_A(x)$ = grado en que la variable x , en la etiqueta A
- $\mu_B(x)$ = grado en que la variable x , en la etiqueta B
- $\mu_{A \cup B}(x)$ = unión de funciones de pertenencia
- $\mu_{A \cap B}(x)$ = intersección

Las funciones que cumplen estas condiciones se conocen respetivamente como Conorma Triangular (T-Conorma) y Norma Triangular (T-Norma).

Tabla 4. Conorma y Norma de las condiciones

Conorma	Norma
MAX (a, b)	MIN(a, b)
(a + b - ab)	(ab)
a + b = MIN(1, a + b)	a * b = MAX(0, a + b - 1)

A continuación, se presentan las operaciones que se pueden realizar entre los conjuntos borrosos se las resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Operaciones entre conjuntos borrosos

	Operación	Rango
Igualdad	$\mu_A(x) = \mu_B(x)$	$x \in U$
Unión	$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	$\forall x \in U$
Intersección	$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	$\forall x \in U$
Complemento	$\overline{\mu_A}(x) = 1 - \mu_A(x)$	$x \in U$
Norma	$\mu_{Norma(A)}(x) = \frac{\mu_A(x)}{\max[\mu_A(x)]}$	$x \in U$
Concentración	$\mu_{conc(A)}(x) = (\mu_A(x))^2$	$x \in U$
Dilatación	$\mu_{Dilat(A)}(x) = (\mu_A(x))^{0.5}$	$x \in U$

Las últimas 2 operaciones de la **Tabla 5** son modificadores, formalizan un tipo de modificador sobre uno mismo en un lenguaje común como ejemplo muy o más o menos.

4.2.3.9 Inferencia Borrosa

La lógica borrosa se ocupa del razonamiento formal con preposiciones, mismas que pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso. La lógica borrosa es proporcionar un soporte formal a un razonamiento en lenguaje natural caracterizado por ser un

razonamiento de tipo aproximado, usando proposiciones que expresan información de carácter impreciso.

4.2.3.9.1 Principio de extensión

Este principio permite convertir conceptos en borrosos, siendo una base de inferencia en los sistemas borrosos. Sea U y V dos universos de Discurso, además de f que representa función de U a V , para un conjunto borroso A en U el principio de extensión define un conjunto borroso B en V dado por:

$$\mu_B(v) = \sup_{u \in f^{-1}(v)} [\mu_A(u)] \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde,

- $\mu_B(v)$ representa el máximo de $\mu_A(u)$ para todos los $u \in U$ que cumplen $f(u) = v$, donde $v \in V$ y se supone que $f^{-1}(v)$ no es vacío, si fuese vacío para algún $v \in V$, se define con $\mu_B(v) = 0$.

4.2.3.9.2 Relación borrosa

Una relación borrosa en dos universos de discurso U y V , se define como un conjunto borroso R en el espacio $U \times V$, esta función se denota como $\mu_R(u, v)$ con $u \in U$ y $v \in V$.

Se puede definir también la composición Sup-Star RoS para dos relaciones borrosas R y S en $U \times V$ y $V \times W$, respectivamente como otra relación borrosa con la inclusión siguiente.

$$\mu_{R \circ S}(u, w) = \sup_{v \in V} [\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)] \quad \text{Ecuación (15)}$$

En donde,

- $u \in U$, $v \in U$, $w \in W$ y el operador (*) puede ser cualquier t-norma definida, así en contexto se podría decir que la composición Sup-Star de dos relaciones borrosas $R \circ S$ es un conjunto borroso $U \times W$, dependiendo de la elección particular para el operador *, se pueden tener distintos casos particulares de relaciones borrosas.

4.2.3.9.3 Implicación borrosa

Si se definen dos conjuntos borrosos A y B en U y V , una implicación borrosa de A en B se indica con $A \rightarrow B$, es una relación borrosa en $U \times V$, que puede venir por alguna de las siguientes funciones de inclusión empleadas en la literatura de lógica borrosa:

- **Conjunción borrosa**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) + \mu_B(v) \quad \text{Ecuación (16)}$$

- **Disyunción borrosa**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) \dot{+} \mu_B(v) \quad \text{Ecuación (17)}$$

- **Implicación material**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_{\bar{A}}(u) + \mu_B(v) \quad \text{Ecuación (18)}$$

- **Cálculo proposicional**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_{\bar{A}}(u) + \mu_{A * B}(v) \quad \text{Ecuación (19)}$$

- **Modus ponens generalizado**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \sup\{c \in [0,1] \mid \mu_A(u) * c \leq \mu_B(v)\} \quad \text{Ecuación (20)}$$

- **Modus Tolens generalizado**

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \inf\{c \in [0,1] \mid \mu_B(u) * c \leq \mu_B(v)\} \quad \text{Ecuación (21)}$$

4.2.3.10 Reglas Borrosas

Combinan conjuntos de entrada que se asocian a un conjunto de salida, los conjuntos de entrada se conocen como antecedentes o premisas, un conjunto borroso de salida se llama consecuente o consecuencia. Los conjuntos borrosos de la premisa se asocian mediante conjuntivas lógicas como y, o, etc.

Las distintas reglas permiten expresar el conocimiento sobre la relación ante antecedentes y consecuentes. Para dar la expresión de esto se precisa varias reglas, agrupándose dan una base de reglas.

La base de reglas se puede representar como una memoria asociativa borrosa o **FAM**. Son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas, las FAM realizan una representación gráfica clara de las relaciones entre dos variables lingüísticas de entrada y la variable lingüística de salida.

Una base de reglas borrosa es una colección de reglas con el formato:

$$R^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad \text{Ecuación (22)}$$

En donde,

- F_n^l y G^l son conjuntos borrosos en $U_i \subset R$ y $V \subset R$, respectivamente,
- y $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U_1 \times \dots \times U_n$ e $y \in V$ son variables lingüísticas. El formato representado es conocido como borroso puro o de tipo Mamdani.

Otro formato de reglas es de tipo Sugeno, la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, o en un caso más general, una función genérica de las variables de entrada:

$$R^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y^l = f^l(x) \quad \text{Ecuación (23)}$$

- M es el número de reglas IF-THEN de la base de reglas entonces $l=1, 2, \dots, M$ en las ecuaciones (22) y (23), el vector x representa el conjunto de las entradas, y es la salida del sistema borroso.

- Los sistemas borrosos con n entradas x_i y una sola salida y , se conocen como MISO (*múltiple Input Single Output*), los valores tienen varias salidas (de 1 hasta k) se conocen como MIMO (*Múltiple Input Múltiple Output*).

4.2.3.11 Fuzificador

4.2.3.9.1 Fuzificador singleton

Método muy utilizado, consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos borrosos. Para cada valor de entrada x se define un conjunto A' que lo soporta, con función de pertenencia $\mu_A(x')$ de modo que $\mu_A(x) = 1$, y $\mu_A(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que $x' \neq x$.

4.2.3.9.2 Fuzificador no singleton

Este método se utiliza una función exponencial del tipo siguiente:

$$\mu_A(x') = a \cdot \exp\left[-\left(\frac{x' - x}{\sigma}\right)^2\right] \quad \text{Ecuación (24)}$$

Esta función con forma de campana centrada, donde los valores son:

- x = valor de entrada
- σ = valor de anchura
- a = amplitud

4.2.3.12 Defuzificador

Es la función que transforma un conjunto borroso en V , puede ser una salida de un dispositivo de inferencia borrosa, en un valor no borroso $y \in V$. Se utilizan diversos métodos para esta tarea:

4.2.3.9.1 Defuzificador por máximo

Se define como y es el punto de V en que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo, donde $\mu_{B^l}(y)$ está definido en la función de B^l de salida.

$$y = \operatorname{argsup}_{y \in V} (\mu_{B^l}(y)) \quad \text{Ecuación (25)}$$

4.2.3.9.2 Defuzificador por media de centros

Esta función representa y^{-1} como el centro del conjunto borroso G^l definido como un punto V en el que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo.

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-1} (\mu_{B^l}(y^{-1}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B^l}(y^{-1}))} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde,

- y^{-1} = centro del conjunto borroso G^l

4.2.3.9.3 Defuzificador por centro de área

Esta función está definida como:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M M^l(\mu_{B'}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M A^l(\mu_{B'}(y^{-l}))} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$= \frac{\sum_{l=1}^M \int_v \mu_{B'}(y^{-l})^2 dy M^l(\mu_{B'}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M \int_v \mu_{B'}(y^{-l}) dy^l}$$

• M^l , momento que va en torno al eje y del universo de discurso de la salida V de la función de inclusión del conjunto borroso G^l

- A^l es el área.

Estos métodos de desborrosificación son los empleados para la obtención del valor de salida no borrosa de un dispositivo de inferencia borrosa que utiliza reglas de tipo Mamdani. Si las reglas utilizadas son del tipo Sugeno, el valor de la salida no borrosa se obtiene como media ponderada de las salidas de cada regla de la base de reglas según:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^l(\mu_{A'}(x))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{A'}(x))} \quad \text{Ecuación (28)}$$

En donde,

- y^l es la salida de la regla l
- $\mu_{A'}(x)$ termino que se puede usar una regla de tipo Sugeno como una combinación lineal de entradas.

$$y' = f_l(\underline{x}) = a_{l,0} + \sum_{i=1}^n a_{l,i} x_i \quad \text{Ecuación (29)}$$

4.2.3.13 Sistemas de control Difuso

Los sistemas de control difuso basados en reglas conocidos como controladores borrosos o **FLC**, o sistemas de inferencia borrosa son la aplicación extendida de la lógica borrosa (**FIS**), el control difuso también como un controlador en base a palabras que definen un estado, un tiempo, un lugar, una medición en común, para ello se realiza una adaptación de estas palabras para ser usado en la programación a esto se llama la etapa de fusificación la cual concede datos de entrada y salida relacionados en un grado de membresía, así mismo una vez determinados y adaptadas las expresiones se usan reglas donde se relacionen unas con otras llamada (*IF-THEN*) si-entonces aquí para que puedan ser interpretadas las variables en la programación, luego de este proceso se realiza la defusificación donde toma lugar la conversión de estos términos en números para que puedan ser transformadas en una

señal digital a analógica para que pueda ser aplicada en el banco o planta de proceso. La estructura de un sistema de control se enmarca con el controlador implementado al proceso como en la **Figura 14**.

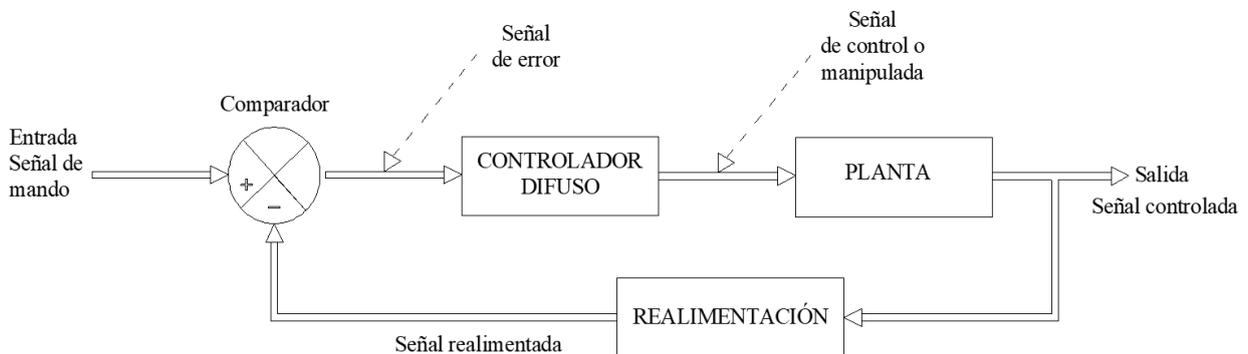


Figura 14. Control Directo de un proceso

Para poder controlar un proceso o sistema se hace uso de un módulo controlador en este caso un difuso, el cual recibe entradas una o más variables de control llamadas referencias, \bar{R} , y una o varias variables de salida, \bar{S} , aquí intervienen salidas que funcionan como actuadores \bar{A} el objetivo de este controlador es mantener $\bar{R} = \bar{S}$.

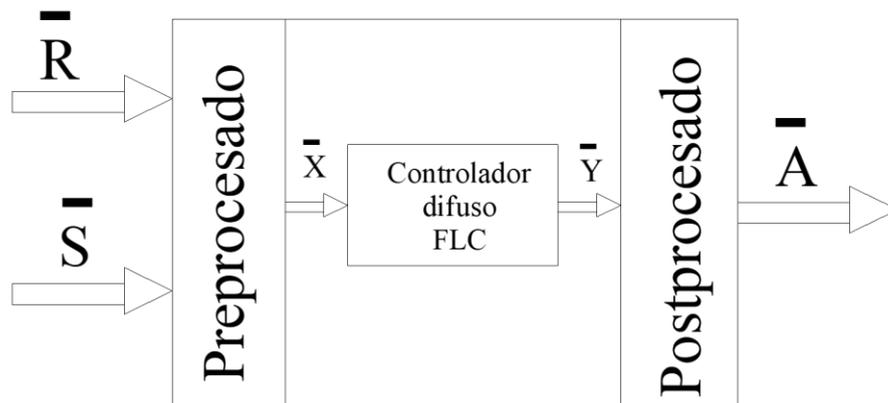


Figura 15. Estructura de un controlador (FLC es el controlador borroso)

En la **Figura 15** denota la estructura típica de un controlador basado en un sistema borroso, un primer bloque realiza la función de preprocesado de las variables de entrada que luego proporciona el vector de entradas al controlador borroso o FLC. El controlador borroso aplica la entrada que recibe a la base de reglas para obtener la salida, juntamente la salida puede requerir un postprocesado para tener un adecuado control.

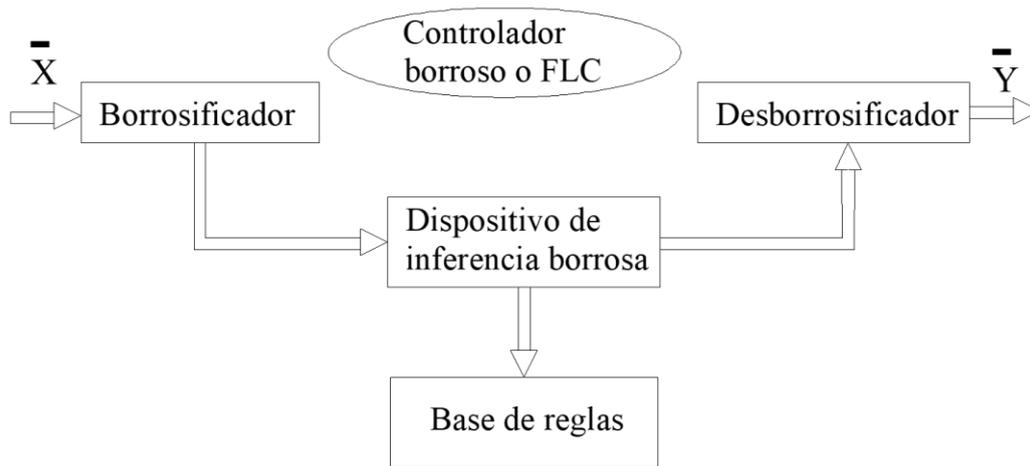


Figura 16. Estructura de un controlador borroso o FLC

Se observa la estructura interna de un controlador borroso **Figura 16**, el primer elemento se usa un borrosificador el cual realiza las conversiones de valores discretos a términos borrosos a la salida de este dispositivo llega y es utilizada por el dispositivo de inferencia borrosa en donde se aplica la base de reglas, tomando en cuenta el método de inferencia seleccionado, también a la salida de este se presentan M conjuntos borrosos o un conjunto borroso B y al finalizar se utiliza el desborrosificador

4.2.4 Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales imitan la estructura hardware del sistema nervioso, con la intención de construir sistemas de procesamiento de la información que puedan presentar un cierto comportamiento “inteligente”.

La idea que se tiene de los sistemas neuronales artificiales es de abordar el tipo de problemas que el cerebro resuelve con eficiencia, se puede resultar construir sistemas que copien una estructura de redes neuronales biológicas para alcanzar una funcionalidad similar.

Por lo que esta técnica sirve en muchos problemas de aplicación y necesidades en los diferentes ámbitos de estudio o trabajo, por lo que también se puede implementar en un tipo de investigación como es la del desarrollo de un sistema de control inteligente.

4.2.5 Trabajos relacionados (aplicación de control inteligente a control de presión)

- **“Diseño y Construcción de un Banco para la medición y control de la presión en un proceso experimental”**

En la presente Trabajo de Integración Curricular se diseña el sistema experimental para el control de la presión, se lo ha construido al banco mediante una válvula proporcional, así mismo como los equipos e instrumentos de medición para la adquisición y control del

sistema, además de esto se ha diseñado y se ha implementado un sistema de adquisidor de datos en el software LabVIEW, el cual registra los datos y el software MATLAB con la herramienta Ident se obtiene el modelo matemático, así mismo que se haya realizado esto se implementó un controlador PI el cual fue el que mejor ajusto al sistema (Tandazo Solano, 2014).

- “Diseño de un sistema de control avanzado para el banco de presión del laboratorio de Automatización Industrial”

En la Trabajo de Integración Curricular siguiente se obtiene el modelo matemático de la dinámica del proceso, a mejoramiento de la Trabajo de Integración Curricular inicial se diseña un control avanzado para el sistema, un controlador Predictivo Basado en Modelo (MPC), en comparación del controlador diseñado en la presente Trabajo de Integración Curricular como la anterior se tiene una mejor opción para el funcionamiento del banco de control de presión (Ramos Moreno, 2015).

4.3 Identificación de sistemas

Los modelos matemáticos se los puede obtener de dos maneras:

- Modelación analítica.

Se obtiene la función de transferencia en base a las leyes físicas fundamentales para imitar el comportamiento del sistema, hay que tener en cuenta que no todos los sistemas se pueden modelar debido que existe complejidad por las leyes físicas que se desconocen.

- Identificación experimental de sistemas

La función de transferencia se obtiene mediante la utilización de datos experimentales o registros de señales tanto de entrada y salida.

4.3.1 Modelado analítico

El modelamiento es un aspecto de gran importancia en la ingeniería, conlleva representar de forma matemática un fenómeno físico, dado que así es posible realizar un análisis cuantitativo del sistema además de sus características, su comportamiento y las limitaciones (Hernández Gaviño, 2010).

Para dar paso al modelado es necesario la identificación de la o las variables que hacen un cambio en el sistema, además de una suposición empírica o también que esté basada en una ley física que simbolice el sistema en forma matemática, existen distintos sistemas de control que se pueden modelar como sistemas eléctricos, mecánicos de traslación o de rotación, térmicos, hidráulicos y sistemas híbridos.

La metodología a realizar para la determinación del modelo matemático se resume en la siguiente **Tabla 6**.

Tabla 6. Metodología modelado matemático

Paso	Metodología
1	Identificación de las ecuaciones de equilibrio o leyes físicas
2	Planteamiento de ecuaciones integro-diferenciales correspondientes a cada variable
3	Transformada de Laplace a cada ecuación con condiciones iniciales cero
4	Relación de variable de salida y entrada

Fuente:(Argüelles Hernández, 2016)

4.3.2 Modelado matemático mediante identificación experimental de sistemas

La identificación de sistemas son estudios o técnicas donde se obtiene un modelo matemático de sistemas dinámicos mediante mediciones como entradas $u(t)$ o variables de control, salidas $y(t)$ o variables controladas y perturbaciones realizadas en el proceso como se puede observar en la **Figura 17**. (Sedano, 2009)

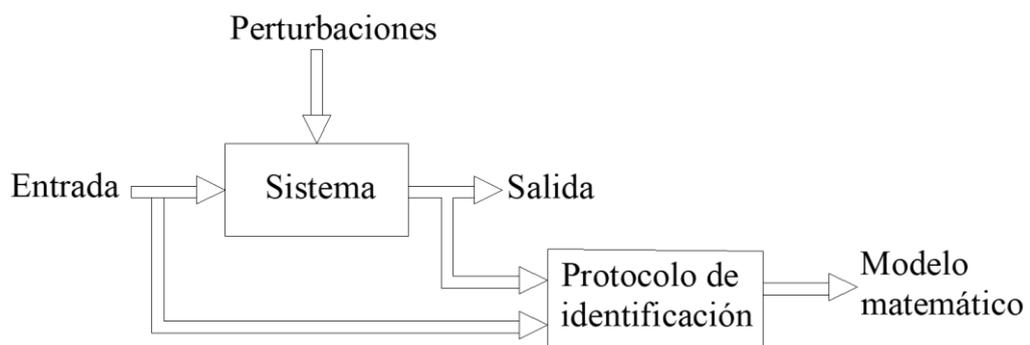


Figura 17. Proceso de identificación de un sistema

Fuente: (Sedano, 2009)

El proceso comprende algunas acciones donde se las realiza usando tanto software y hardware para llevar a cabo la identificación de sistemas las cuales se puede observar en la **Figura 18**.

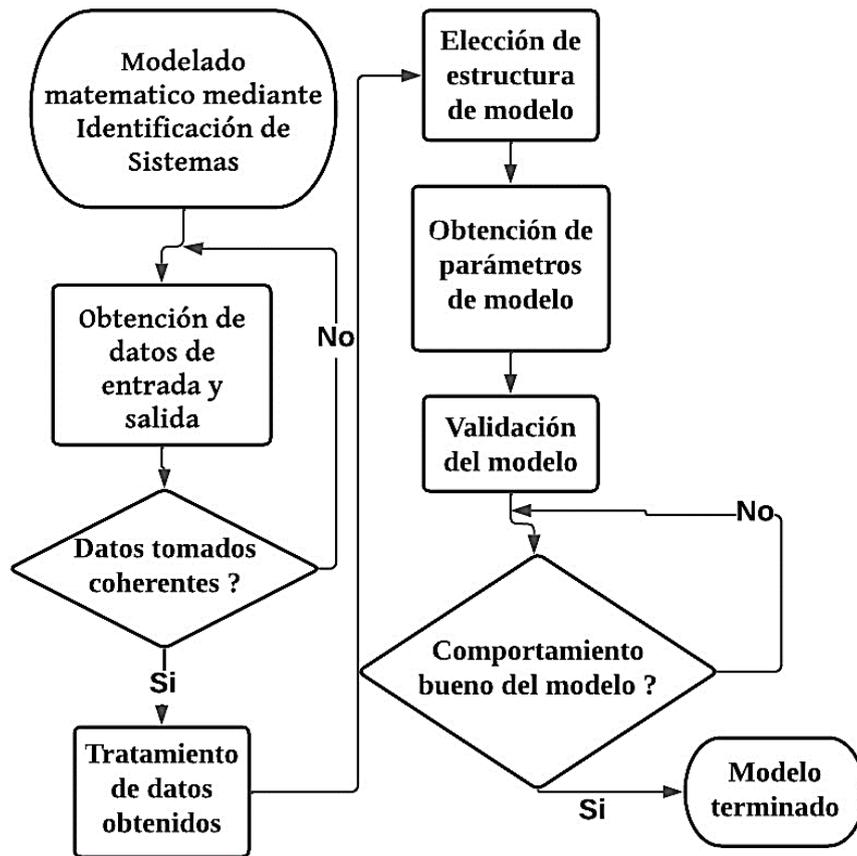


Figura 18. Diagrama de flujo de modelado matemático en identificación de sistemas

1. Obtención de datos de entrada y salida

Se debe aplicar una señal de entrada y así mismo se registra la evolución de salidas y entradas durante un tiempo dado, un aspecto importante se debe considerar que se debe elegir un rango de muestreo

2. Tratamiento de datos obtenidos

Para este paso se observa y se repara los datos erróneos que existen además eliminando tendencias a altas frecuencias.

3. Elección de estructura del modelo

Se define un modelo a utilizar puede ser lineal no lineal, discreto o continuo, determinando una estructura a desear, a ello se debe tener bases de conocimiento basándose en las leyes físicas que van a regir el proceso.

4. Obtención de parámetros de modelo

Para la obtención de los parámetros se elige un método de estimación de parámetros que se pueden ajustar ante el modelo a utilizar.

5. Validación del modelo

En el paso final se compara el comportamiento del modelo y se lo evalúa.

4.4 Diseño de sistemas de control asistido por computador

4.4.1 LabVIEW

LabVIEW 2011 es el software y la versión del año que se usa en el banco de presión, se trata de un software de ingeniería de sistemas que se utiliza en aplicaciones donde se requieren realizar pruebas, medidas y control, teniendo un acceso rápido programas e información, es un entorno de programación gráfica en donde se desarrollan sistemas de pruebas automatizadas de investigación, su entorno de desarrollo es gráfico, flexible, así mismo se puede realizar varias actividades dentro del software como:

- Crear un VI
- Crear un proyecto
- Edición de programación gráfica

Se puede realizar toma de datos en tiempo real en varios módulos de conexión así mismo realiza un respaldo de ellos en archivos Excel y Block de notas. (Julían Laime & Almidos Elescano, 2018)

4.4.2 MATLAB®

Lenguaje de programación así mismo como un laboratorio de matrices, este software tiene un alto rendimiento en análisis numéricos, procesamiento de señales, gráficos entre las más destacadas son:

- El entorno se puede realizar diseño y solución de problemas
- Gran librería de funciones para el cálculo avanzado en álgebra, estadística o cálculo numérico
- Librerías como *Toolboxes* en diferentes ámbitos de ingeniería y ciencia.

Simulink ofrece la capacidad de modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, cuenta con herramientas gráficas, muy usado en Control y procesamiento de señales en la simulación de sistemas y diseño de modelos en los sistemas (G, 2007)

4.4.3 Herramienta computacional para la adquisición de datos (App de LABVIEW)

La adquisición de datos tiene el propósito de medir un fenómeno, este puede ser eléctrico o físico mediante el uso de dispositivos donde combinan el uso de software como hardware como sensores, VI, programas, actuadores, etc., esta combinación comprende la adquisición de datos y la presentación de los mismos tomados en la herramienta computacional (Caramillo Ramos, 2017).

LabVIEW comprende un entorno de programación gráfica donde simula en un panel frontal de un instrumento de mediciones de variables, con la asistencia de elementos como módulos FieldPoint, tarjetas de adquisición de datos, cuando se ejecuta un programa (VI) se observa la pantalla frontal como un instrumento físico.

Para la adquisición de datos en relación al software LabVIEW se necesita herramientas como:

- **Measurement & Automation Explorer (MAX)**

Programa integrado en el software National Instruments, mantiene e instala distintos controladores como NI-VISA, NI-DAQmx así mismo la configuración para la conexión entre distintos módulos que existen, con el NI MAX se pueden realizar distintas opciones: (NI, s.f)

- Configurar hardware y software de NI
- Crear y editar canales, tareas, interfaces, escalas e instrumentos virtuales
- Diagnósticos del sistema
- Ver dispositivos e instrumentos conectados a su sistema

- **VI de adquisición de Datos**

Archivo de instrumento virtual (VI) que contiene funciones en el software LabVIEW, las funciones son previamente de algunas librerías que comprende el software un VI contiene:

- Panel Frontal que es la interacción visual y directa con el usuario
- Barra de herramientas de Estado, los cuales contienen botones de simulación, paro y cancelación de ejecución
- Iconos/ conectores suele contener entradas, salidas, indicadores, los valores van fluyendo en estos iconos y conectores

Para la adquisición de datos en VI del software LabVIEW comprende herramientas, iconos donde se realiza conversiones, uso de fórmulas matemáticas para un adecuado procesamiento de señales y variables como un sistema SCADA, el cual realiza cuatro funciones como adquisición de Datos, comunicación, presentación de Información y Control (Robles Algarín, Caputo Llanos, & Sánchez Hernández, 2012)

4.4.4 Herramienta computacional para identificación de sistemas (App de MATLAB®)

El software MATLAB® comprende un amplio repertorio de funciones que se aplican en la identificación de sistemas, estas son agrupadas en *System Identification* herramienta útil y precisa, consta de diferentes algoritmos para un adecuado ajuste de variables y parámetros en los modelos, además de abarcar procesos como: (Noriega Rivas, 2008).

▪ Leer datos de entrada y salida

El proceso de identificación se inicia con la obtención de datos de entrada y salida que son obtenidos experimentalmente, estos son guardados en un archivo de texto o de notas.

▪ Tratamiento de datos

Es el empleo de funciones que filtran o eliminan datos o valores medios, es decir si existen algunas imperfecciones en los datos tomados que presentan incoherencias se los filtra o se elimina a fin de obtener datos correctos.

▪ Identificación Paramétrica

Se utiliza la herramienta *System Identification* donde se cargan los valores obtenidos, además se realiza la estimación de modelos paramétricos en base a sistemas lineales, los cuales se ajustan a una estructura general como:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde,

- $u(t)$ = entrada
- $y(t)$ = salida
- $e(t)$ = ruido
- $A(q), B(q), C(q), D(q)$ = polinomios en función del operador desplazamiento (q)

En la ventana frontal de *System Identification* se realizan estimaciones paramétricas como el método de mínimos cuadrados, método de Yule-Walker y el método geométrico enrejado que son procedimientos de análisis numérico que utilizan conjuntos de datos donde se determina una función que sea aproximada a los datos.

▪ Validación de modelos

Las validaciones de los modelos son basadas en los resultados obtenidos, en la comparación de la salida como en la respuesta que tiene, mediante iteraciones hasta encontrar un modelo óptimo.

En base a lo descrito en el panel frontal del *Toolbox* se puede observar la ventana donde se realiza la identificación de sistemas, así mismo las funciones para este método se realiza la toma y recepción o importación de datos en tiempo continuo como discreto, además de las estimaciones de diferentes modelos que se puede realizar como función de transferencia, modelos de proceso, espectrales, polinomios, etc., además la comprobación como la función de graficar modelos y análisis como *Zeros and Poles* **Figura 19**.

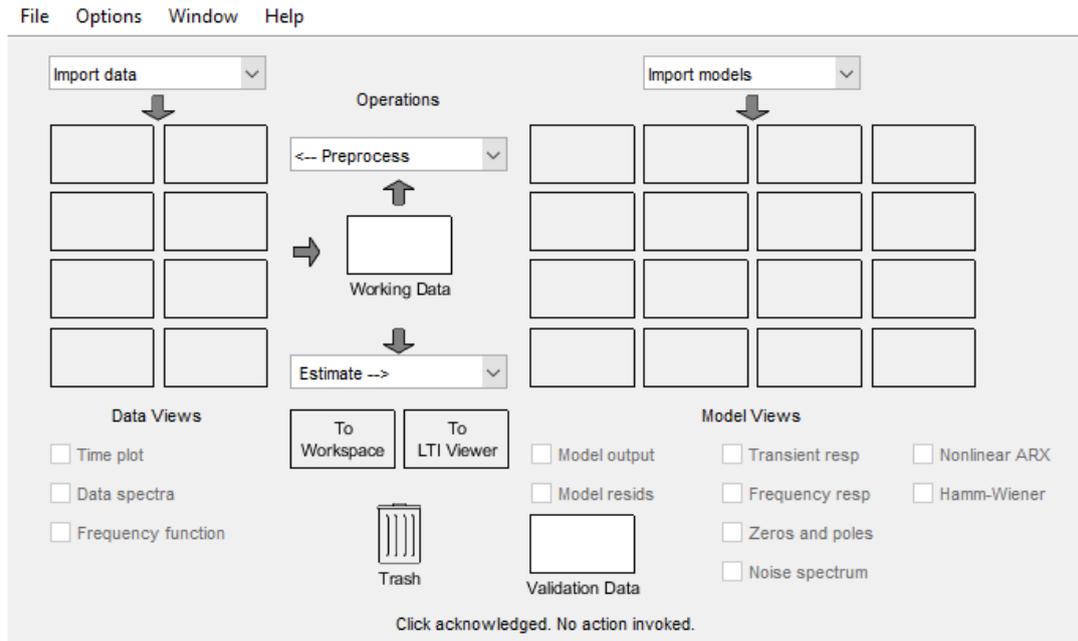


Figura 19. Ventana de System Identification

4.4.5 Herramienta computacional para el diseño de controladores convencionales (App de MATLAB®)

El diseño de controladores comprende una serie de pasos para establecer especificaciones deseadas en el sistema como entendimiento del problema, desarrollo de un modelo lineal, el diseño propio del controlador convencional, además de su verificación y simulación.

El control proporcional integral derivativo es la técnica más usada debido a uso simple estrategia, además de ser efectiva y no disponer de mucha teoría (Ang, Chong, & Li, 2013)

MATLAB® integra la herramienta *Simulink Control Desing* el cual analiza sistemas de control, ajusta arquitecturas de control, se puede calcular linealizaciones exactas de modelos, así mismo comprende el ajuste del controlador PID con la *App PID Tuner*, herramienta útil para generación de soluciones que sean aproximadas a los modelos matemáticos (Tilbury & Messner, 2021).

4.4.6 Herramienta computacional para el diseño de sistemas de control difuso (App de MATLAB®)

El diseño de un controlador difuso presenta un nuevo enfoque al control en sistemas industriales, lineales o no lineales, complejos o modelos que sean difíciles de encontrar una determinación, para ello MATLAB® comprende herramienta *Fuzzy Logic Toolbox* la cual ofrece análisis, diseño y simulación de sistemas en lógica difusa, donde permite la configuración y especificación de entradas, salidas, las funciones de transferencia además de las reglas de inferencia. (Castaño Giraldo, Hernandez Gomez, & Gallo Blandón, 2013)

La App utiliza una pantalla frontal conocida como *FIS Editor* donde utiliza funciones de línea de comandos, herramientas gráficas e interactivas, bloques de *Simulink*, maneja un sistema de monitoreo de la variable a controlar, se pueden seleccionar el número de entradas y salidas como se aprecia en la **Figura 20**. Así mismo comprende ventanas de configuración en base a las diferentes funciones de membresía.

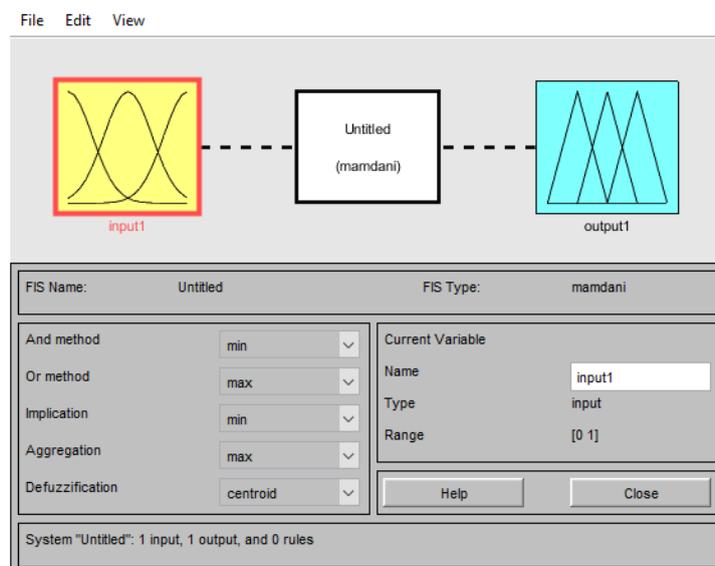


Figura 20. *Fuzzy Logic Designer*

Para tener la relación de las funciones de membresía se utilizan las reglas difusas donde usa la herramienta *Rule Editor* el cual permite crear y modificarlas, teniendo opciones de eliminar reglas, añadir una nueva o cargar reglas previamente hechas **Figura 21**

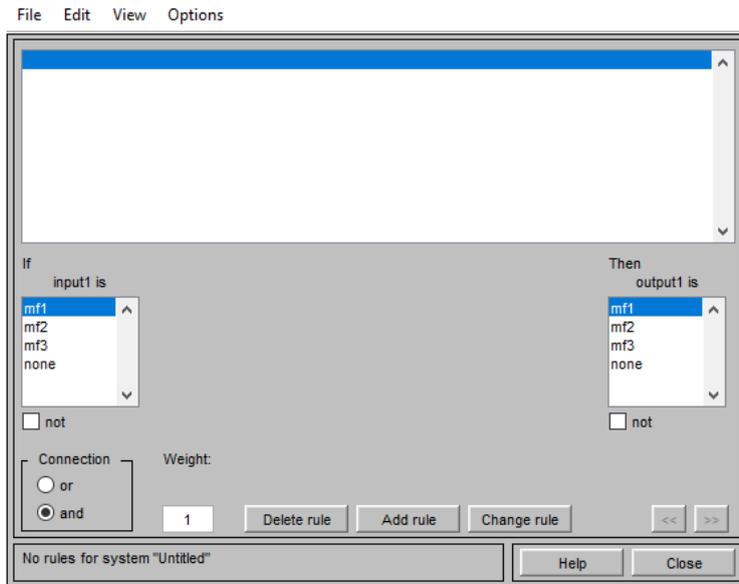


Figura 21. *Rule Editor*

5 Metodología

5.1 Área de estudio

La investigación se realizó en el laboratorio de automatización de la facultad de energía, las industrias y los recursos no renovables, el mismo cuenta con bancos experimentales para realizar pruebas y el material necesario para realizar la exploración, se realizó la investigación en un periodo de 5 meses, el área se lo puede observar en la **Figura 22**.



Figura 22. Ubicación del área de estudio.

El proyecto mantiene la línea de investigación en Industria, innovación y desarrollo tecnológico, así mismo en el área de Control Automático, las coordenadas del lugar donde se realizó el presente trabajo: XRC2+257, C. 9, Loja

5.2 Materiales y Equipo

En el laboratorio de Automatización Industrial de la Facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja. Se encuentra el banco para la medición y control de presión, se ha realizado un inventario de los materiales y equipos que se utilizan, los mismos que se resumen en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Materiales y Equipos

Materiales	Equipos
- Software MATLAB®	Electroválvula de accionamiento 100V
- Software LabVIEW 2011	Electroválvula de Purga 100V
- Cable de conexión Ethernet	Regulador de Presión SMC
	Válvula antirretorno
	Manómetros de presión de entrada

	Válvula proporcional analógica OMEGA 4-20 mA
	Acumulador
	Válvula manual
	Sensor de presión analógico
	Controlador lógico programable
	Computador
	Compresor de Aire

5.3 Métodos

Se ha establecido un proceso de cuatro fases para la ejecución y desarrollo del proyecto. Estas fases se han resumido en un diagrama de flujo y se detallan a continuación:

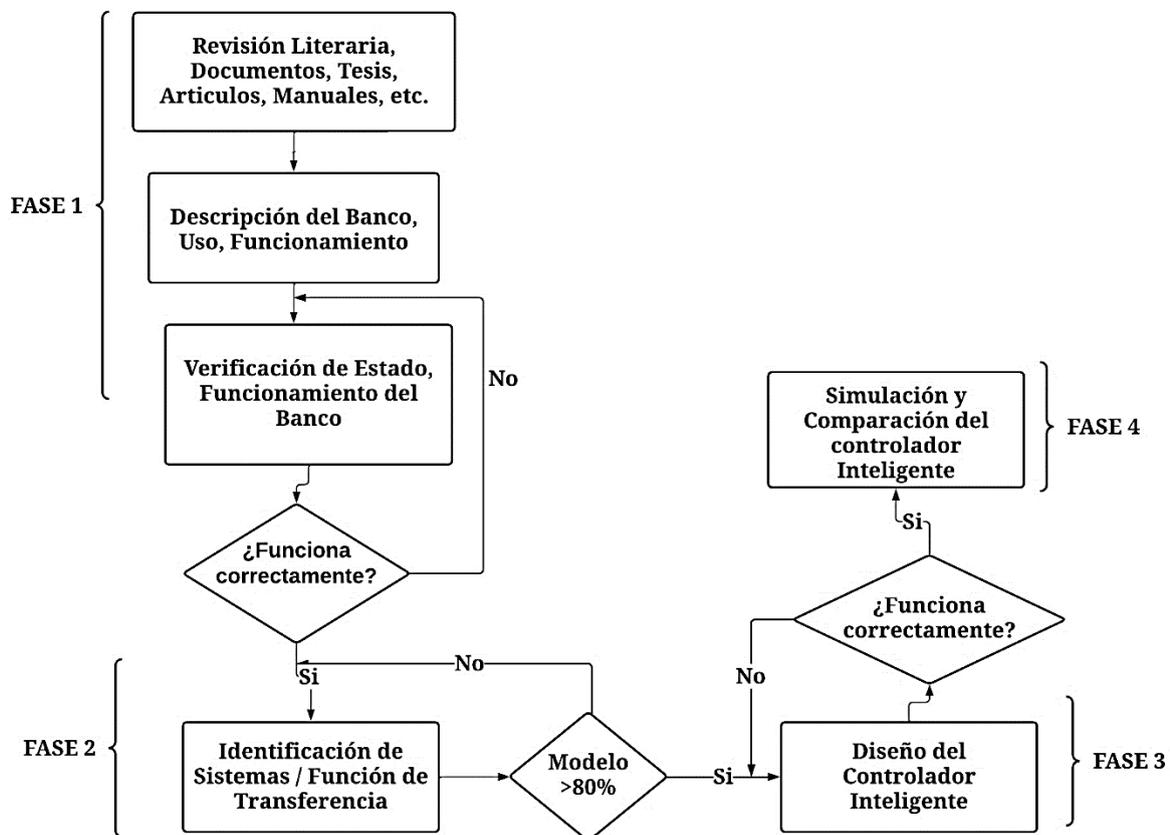


Figura 23. Diagrama de flujo de fases del procedimiento del proyecto

En la primera fase se realiza la revisión literaria acerca de los temas que se abordarán a lo largo de la investigación como sistemas de control inteligente, identificación experimental de sistemas, control y lógica difusa, proyectos de investigación o artículos científicos relacionados a la investigación de sistemas de control difuso, entre otros. También abarca la descripción del banco de presión, conociendo su uso, como se compone,

su funcionamiento; realizando una verificación de componentes si se encuentran en buen estado, las diferentes conexiones como la conexión a red eléctrica, al computador, al sensor de presión como la válvula proporcional. Esta fase trata de recopilar información para el entendimiento y desarrollo de la investigación, obteniendo ideas de cómo se va a trabajar, pasos a realizar y uso de herramientas.

La segunda fase comprende el procedimiento de identificación experimental de sistemas y la obtención del modelo de transferencia que se aproxime a la planta, esta etapa trata la adquisición de datos de distintas pruebas teniendo en cuenta que en todos los experimentos se tiene la misma condición de abertura de válvula de bola para la salida de aire.

Se utiliza el software LabVIEW 2011 para la obtención de valores de los ensayos y guardado de los mismos y también se usa MATLAB® la herramienta *systemIdentification* y verificación de un modelo óptimo por medio de la herramienta *Poles and Zeros* y aproximado a la planta. Se pretende obtener el modelo excelente con un porcentaje mayor a 80% de ajuste de naturaleza lineal.

La metodología a realizar para esta fase se explica a continuación:

5.4 Adquisición de Datos de la planta

5.4.1 Verificación de estado, conexión de la Planta

Consiste en el mantenimiento de los equipos y accesorios que componen el banco es fundamental, la verificación de fugas en las válvulas y mangueras para evitar saltos de datos o a la vez valores erróneos en la identificación de sistemas, la conexión de los módulos Fieldpoint para tener una buena comunicación Ethernet, así mismo el enlace de las electroválvulas y los sensores de presión.

Para dar conexión entre el Fieldpoint y LabVIEW, se requiere la comunicación entre el módulo y el computador en una red Ethernet donde se emplean programas como:

Measurement & Automation Explorer (MAX)

National Instruments Fieldpoint Versión 13.1

LabVIEW 2011

En el computador se realiza la configuración de la dirección IP con dirección a propiedades de Ethernet Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4) escribiendo el código de comunicación distinto a los módulos para que no exista una confusión en la numeración. En el PC se coloca 192.168.1.1 y el FieldPoint 192.168.2 cómo se puede observar en la Figura 24.

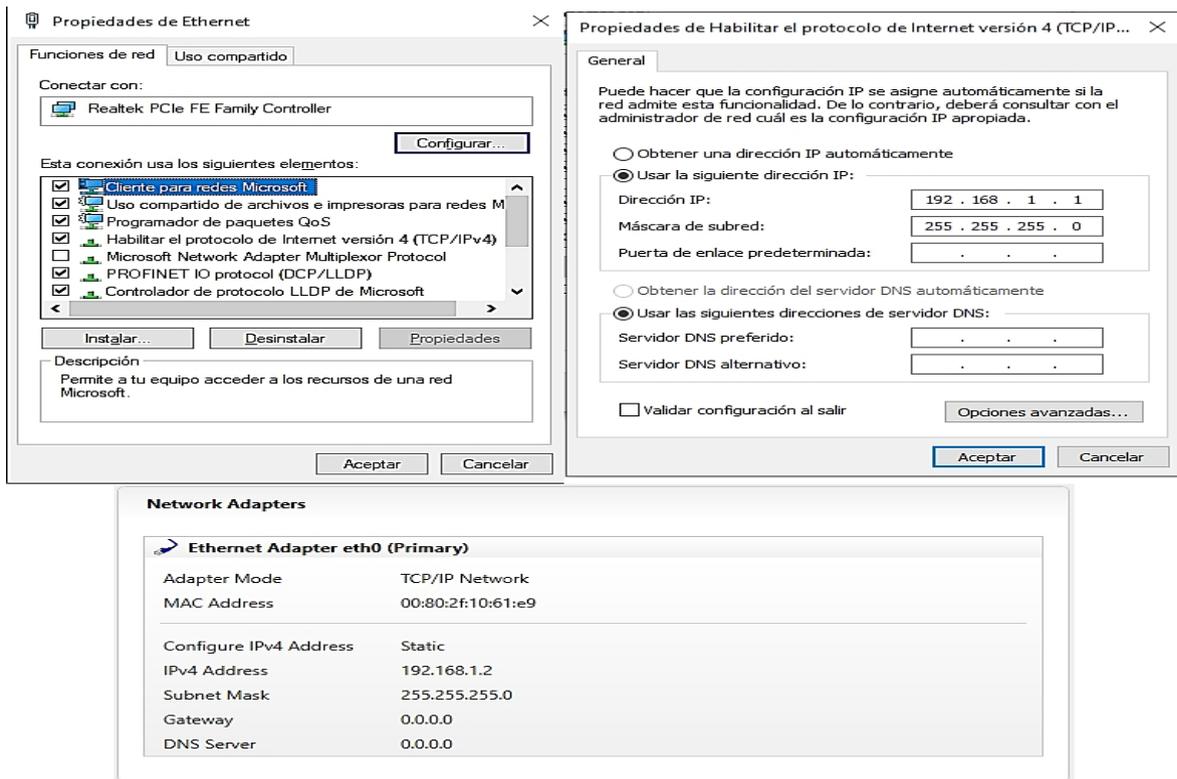


Figura 24. Configuración de IP en PC y FieldPoint

La conexión entre el módulo *Fieldpoint* y el computador se la realiza a través de un cable Ethernet categoría 6 cruzado, además del uso del software *Measurement & Automation Explorer* que visualiza los ítems del paquete FP-2010 en el computador apareciendo carpetas, canales, entradas y salidas en el software. Cada módulo cumple una función en la conexión de entradas y salidas del banco, el FP-AIO-600 se encarga de los canales de entrada y salida, al abrir esta carpeta en el software se los observa, al presionar la opción de *Start* se realiza la conexión como en la **Figura 25**.

Item Name	Address	Value	Range	Timestamp	Status
Input 0	0001	+0.000006	0 to 0.024 Amps	18:14:14:950	Successful
Input 1	0002	+0.004319	0 to 0.024 Amps	18:14:18:351	Successful
Input 2	0004	+0.000000	0 to 0.024 Amps	18:14:09:780	Successful
Input 3	0008	+0.000006	0 to 0.024 Amps	18:14:18:393	Successful
Output 0	0010	+0.000000	0 to 0.021 Amps	18:14:05:346	Successful
Output 1	0020	+0.021000	0 to 0.021 Amps	17:37:25:833	Successful
Output 2	0040	+0.000000	0 to 0.021 Amps	18:14:05:486	Successful
Output 3	0080	+0.000000	0 to 0.021 Amps	18:14:05:564	Successful

Figura 25. Conexión entre PC y FieldPoint

National Instruments LabVIEW 2011

Para la obtención de datos del sensor se utiliza un VI que consta con dos *FieldPoint IO Point Constant* una entrada y salida, toda la programación realizada esta dentro de un *Time Loop*

que toma el control del tiempo en segundos, toda la información de la entrada y salida se transfieren a un VI de la librería *Measurement IO – FieldPoint* que guarda en archivos de texto los datos tomados en los ensayos, el primero del transductor de Presión *NOSHOK 300* (entrada) y el segundo la válvula proporcional *OMEGA* (salida).

La variable de entrada se conecta al VI de lectura (*FP Read.vi*) la misma que relaciona a un VI *Fórmula* para el escalonamiento de señal del transductor de presión, se muestra el valor medido en una variable de salida y se los representa por medio de un *Waveform Graph*.

Por otra parte, el lector VI está conectado un *Convert to Dinamic Data* el cual convierte la información de manera dinámica, la conexión sigue a *Write To Measurement File* para almacenar los datos durante el experimento.

La variable de salida se conecta al VI de escritura (*FP Write.vi*) que escribe y lee los datos de la apertura de la válvula proporcional que se realiza en el ensayo.

La unión después del VI es una conexión simultánea de un VI *Write To Measurement File* que registra los datos, además de un graficador de los datos en tiempo real. Toda la programación se la puede observar en la Figura 26.

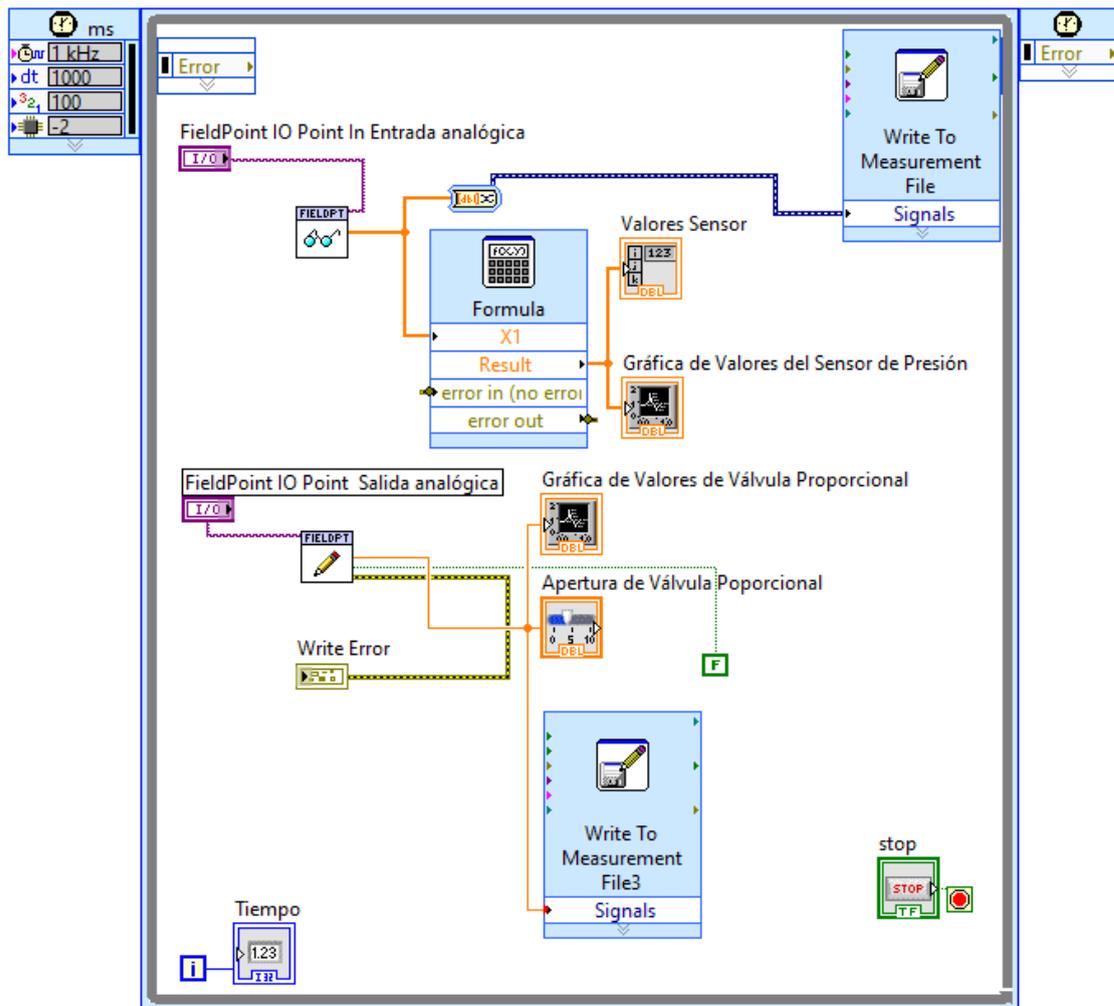


Figura 26. VI de diagramas de bloques para la adquisición de datos

En la **Figura 27**, se puede observar el panel frontal donde se presentan dos esquemas de valores que se van a adquirir a lo largo de los ensayos. La primera representación son los datos de presión que mide el transductor de presión *NOSHOK* en PSI en relación al tiempo, capacidad máxima de medición son de 0 a 15 PSI, la segunda pantalla indica los valores de apertura de la Válvula Proporcional *OMEGA*, valores de 0.004 a 0.021 mA

Para la entrada y salida de variables se toma los canales de comunicación de 0 a 3 de los módulos *FieldPoint* que se tienen por defecto en la conexión, en la toma de muestras se selecciona el canal 1 en el *IO Point* de entrada como *IO Point* de salida y se pulsa el botón de iniciar simulación.

Luego se da una señal a la válvula de apertura, donde da paso de aire a través de las conexiones de las mangueras hasta llegar al tanque de almacenamiento y el transductor toma datos de presión.

A la hora de tomar datos es evidente evidenciar que las gráficas sean sincronizadas, que los datos tomados tengan concordancia, se realizaron 9 ensayos para elegir el óptimo de ellos, se pueden observar desde el **Anexo 1** hasta el **Anexo 9**.

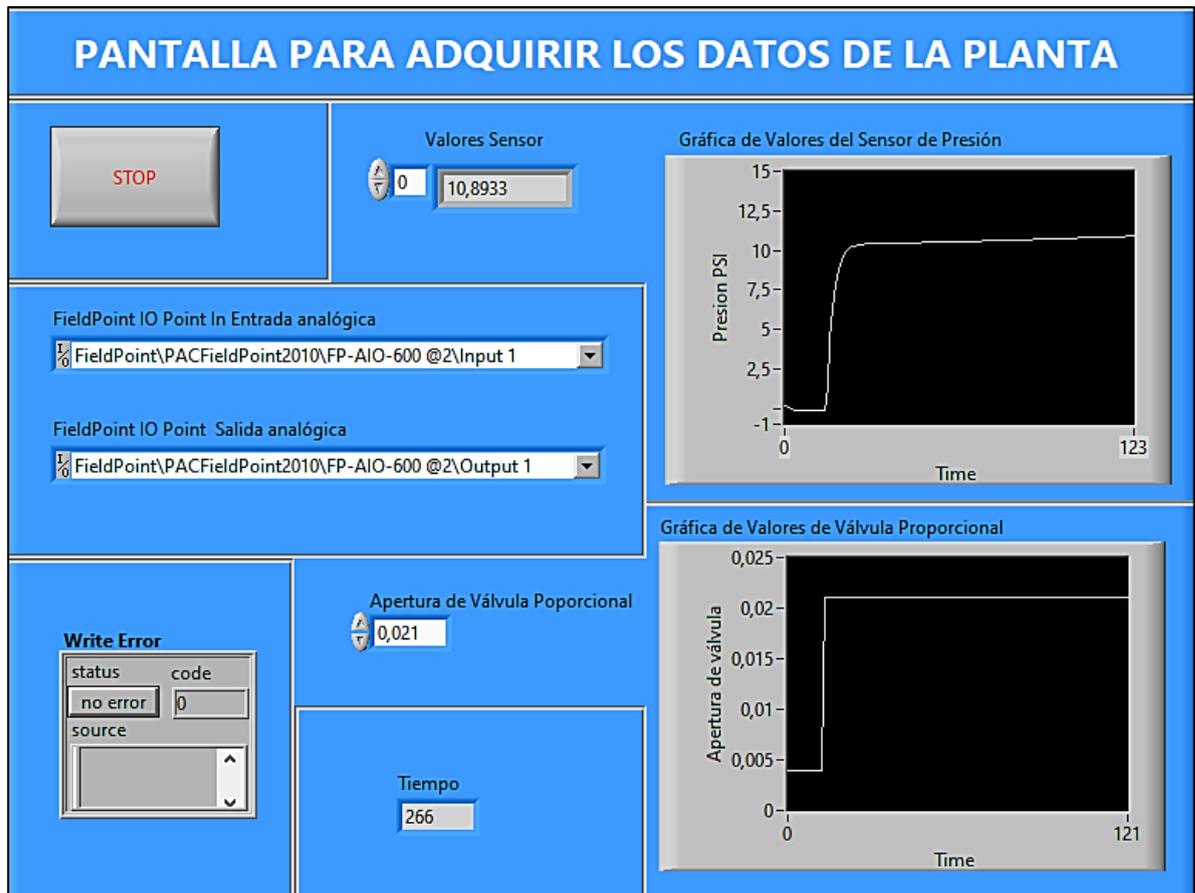


Figura 27. Pantalla para la adquisición de datos

5.4.2 Adquisición de Datos

Una vez realizada la comunicación se procede a la experimentación para la obtención de datos, se puede hacer dando clic derecho en la pantalla de gráficas del VI exportando los datos en un archivo de Block de notas de la válvula proporcional como el transductor de presión, los mismos datos se presentan como datos de entrada y salida.

5.5 Obtención del modelo de transferencia de la planta

5.5.1 Identificación experimental de Sistemas usando el software MATLAB®

Los datos se almacenan en dos vectores en el software MATLAB® siguiente a este paso se utiliza la herramienta *ident*, escribiendo en el *command Windows systemIdentification* el cual abre una ventana para importar datos, seleccionando la opción *Import data*, luego se usa *Time domain data herramienta* para graficar estos valores como se observa en la **Figura 28**.

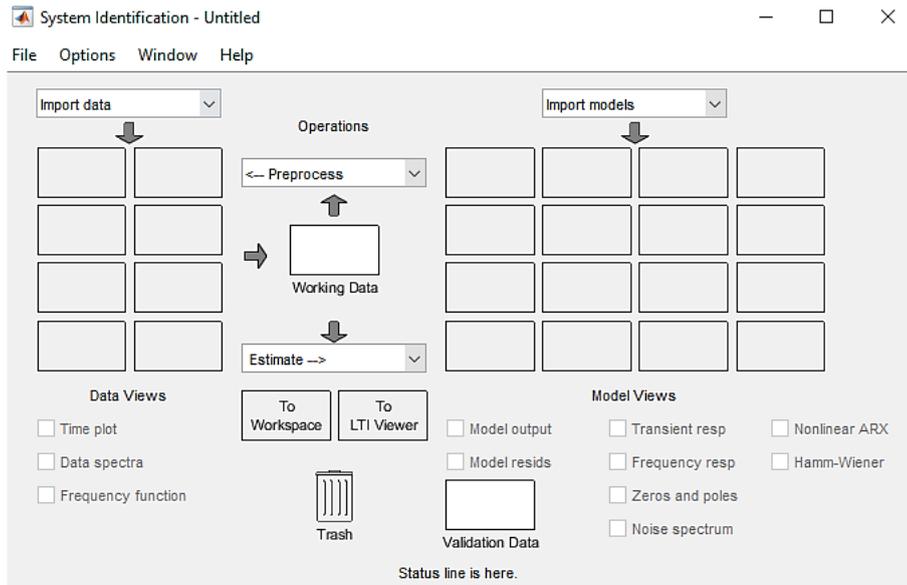


Figura 28. Ventana de la herramienta System Identification

En la **Figura 29** se observa la ventana donde se importa los datos seleccionando la opción de *import*, se presenta una gráfica de los valores cargados, luego de esto se dirige en la opción de *Proces Models* de la barra de *Estimate*, una vez abierta esta ventana se configura estimando el modelo que incluya *Zero* (cero en denominador), *Delay* (se añade un retraso) o *Integrator* (se añade proceso de autorregulación). Así mismo en los modelos de transferencia irán apareciendo, dependiendo las veces que se estime con distintas configuraciones, el debido proceso se lo puede observar en la **Figura 30**.

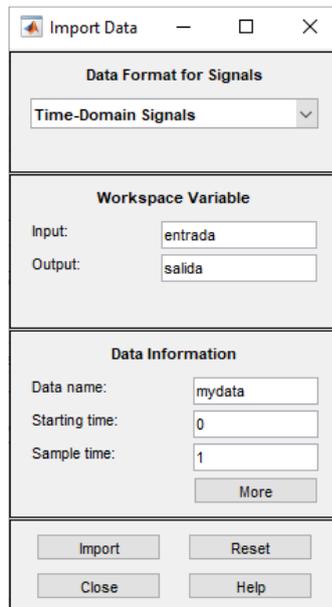


Figura 29. Import Data donde se coloca las variables

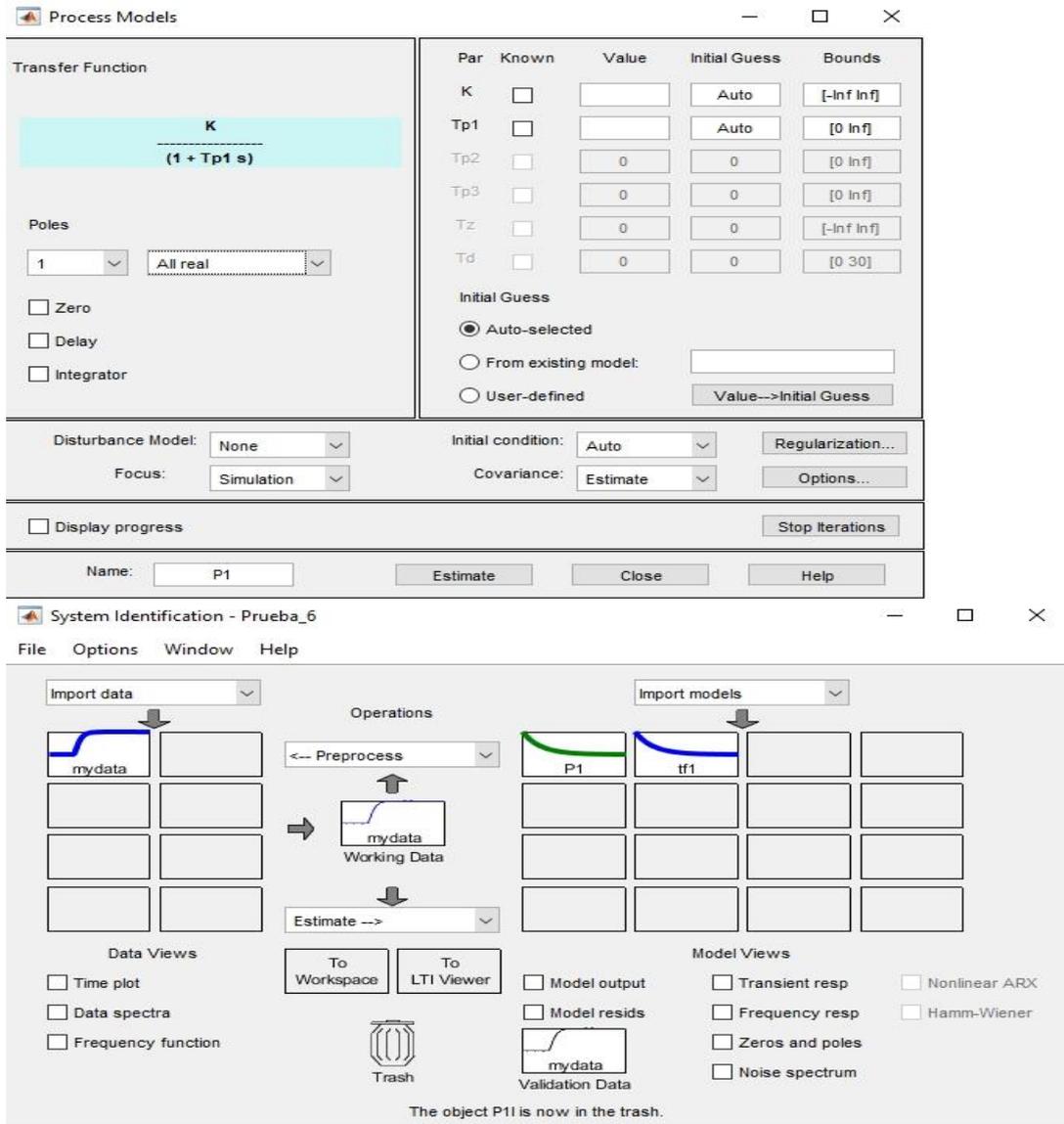


Figura 30. Proceso de estimación de modelo de transferencia

Una vez los modelos obtenidos en las diferentes estimaciones para evidenciar de manera gráfica estos modelos se utiliza la opción *Model output*, el modelo de transferencia debe superar el 80% de semejanza mostrando un mejor y óptimo modelo. Una vez realizada la representación gráfica se puede observar los datos reales y el porcentaje de similitud junto al modelo obtenido evidenciando en la **Figura 31**.

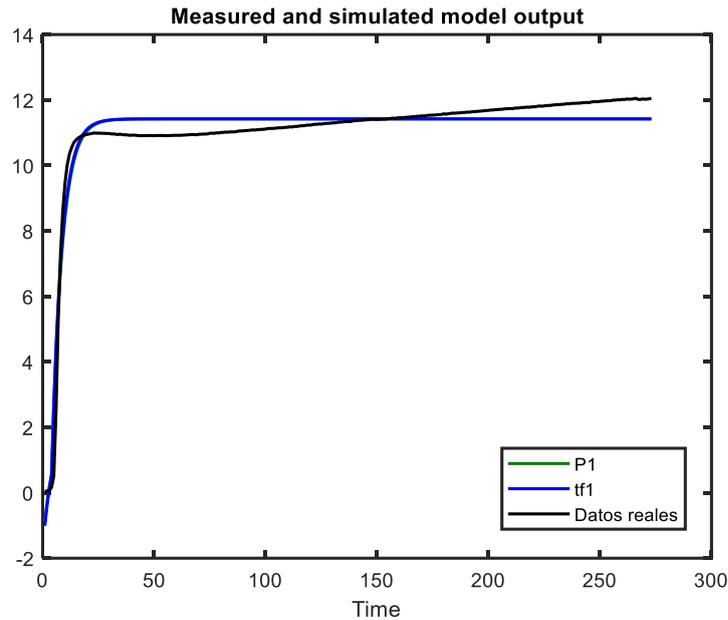


Figura 31. Graficas de los modelos de transferencia

Para tener una verificación de la ecuación obtenida en la gráfica los polos se realiza un análisis de estabilidad del modelo lo cual se utiliza la herramienta *Poles and Zeros*, encuentra la raíz en un plano cartesiano y se verifica si el sistema es estable o no.

El sistema es estable si existe una raíz en el semiplano izquierdo, no debe existir una raíz en el semiplano derecho, caso contrario es inestable, la gráfica del resultado de estabilidad se puede ver en la **Figura 32**.

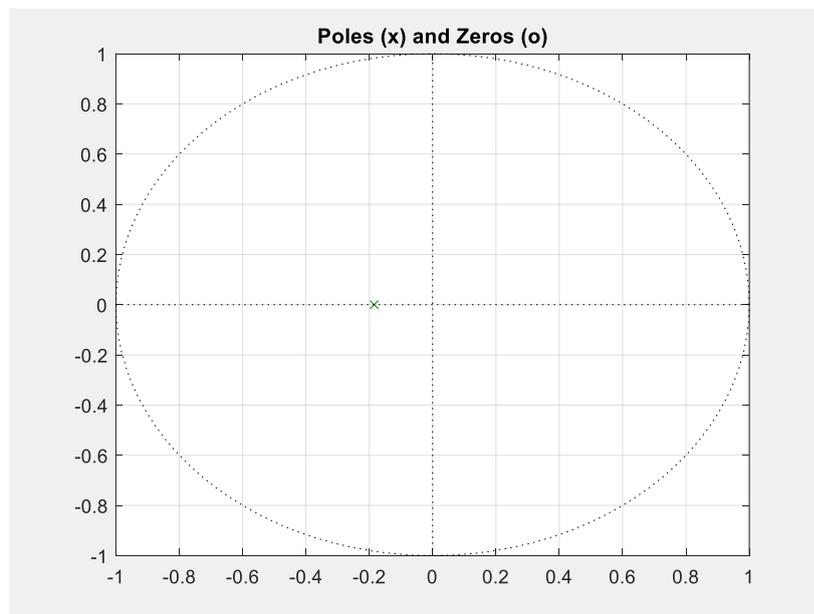
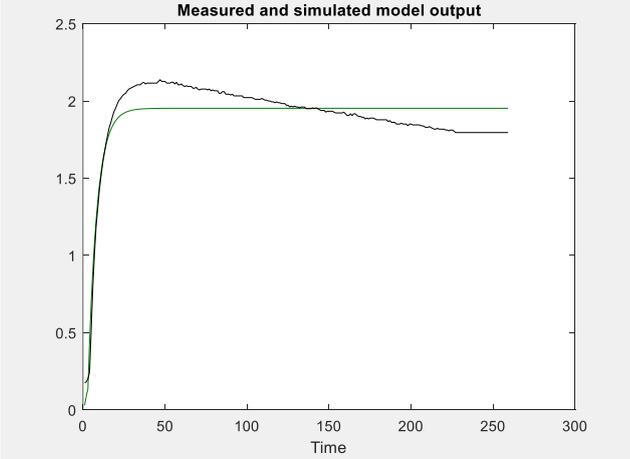
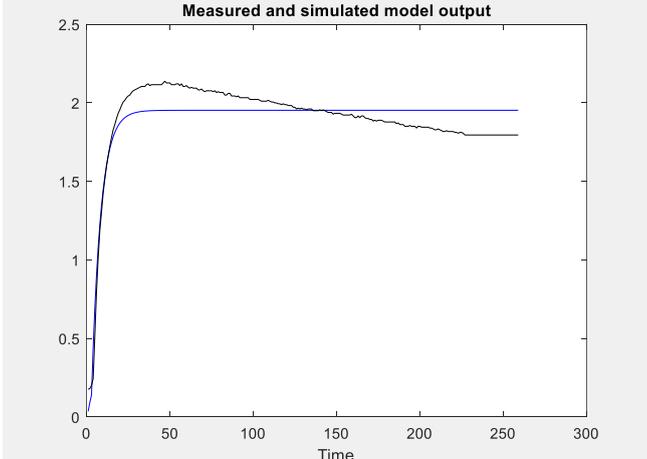
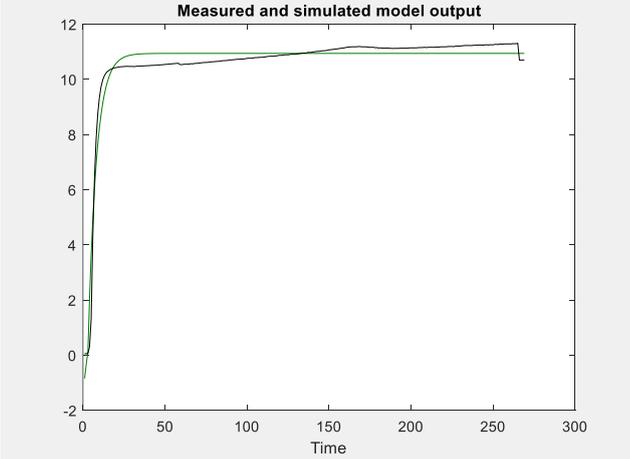
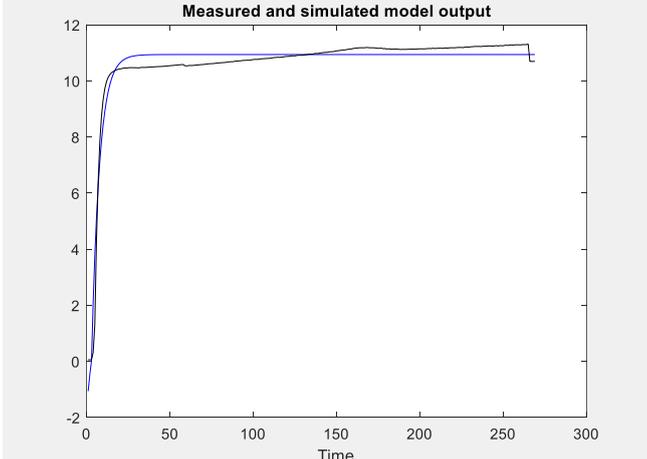


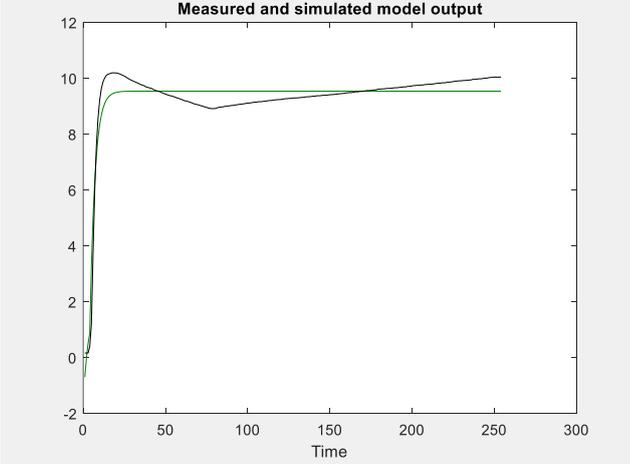
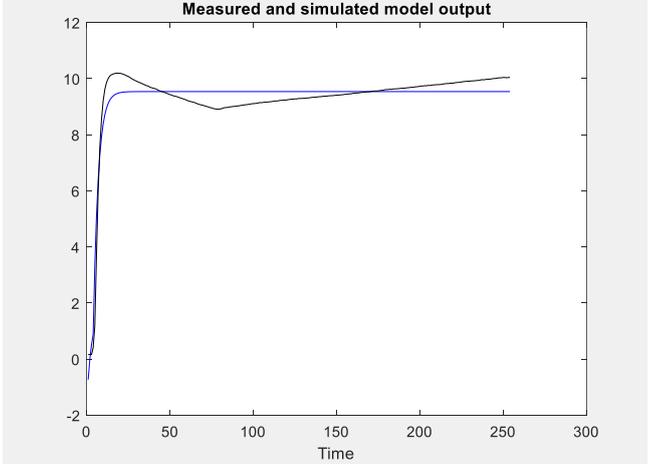
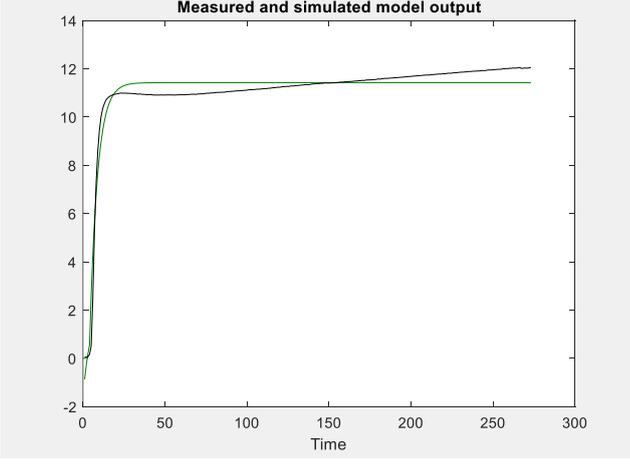
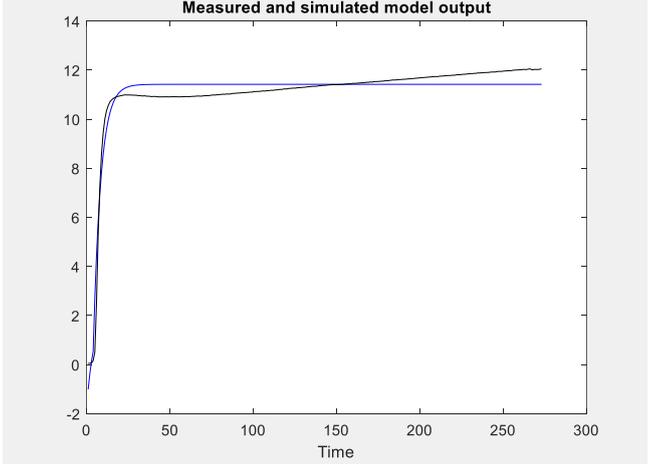
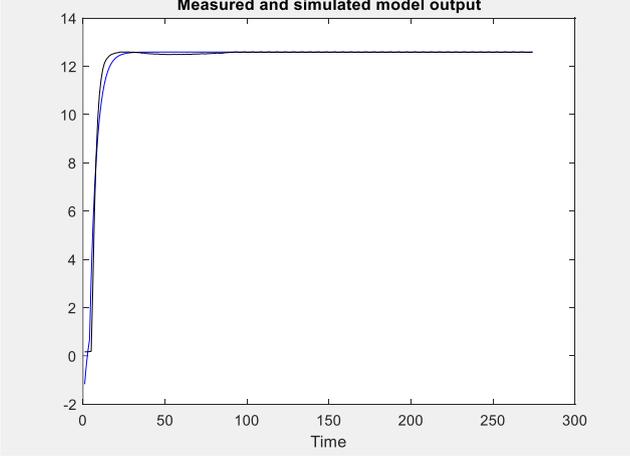
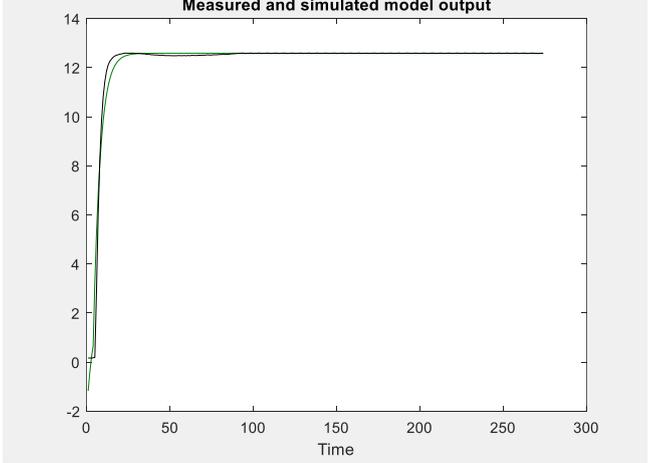
Figura 32. *Poles and Zeros* del modelo de transferencia

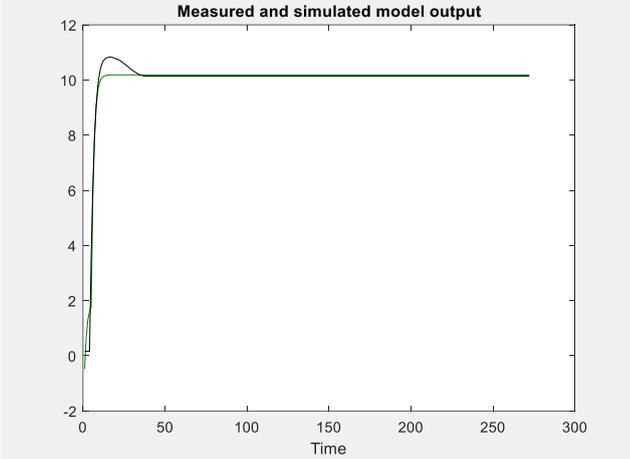
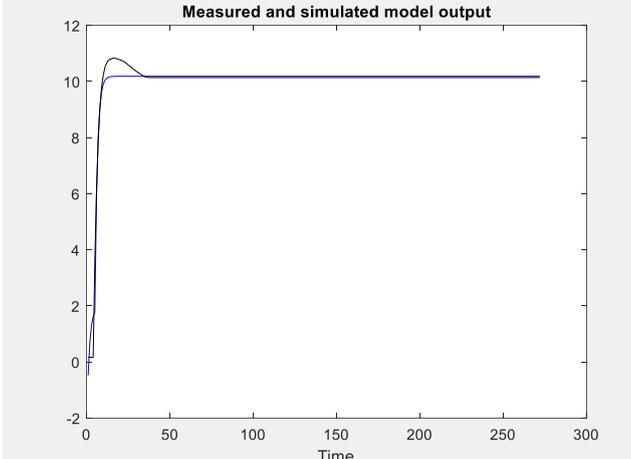
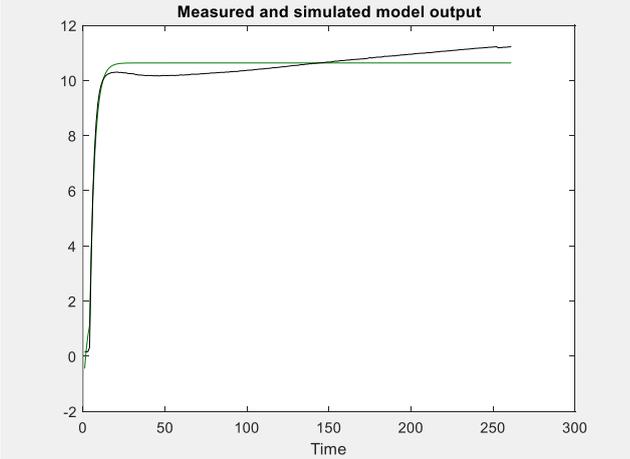
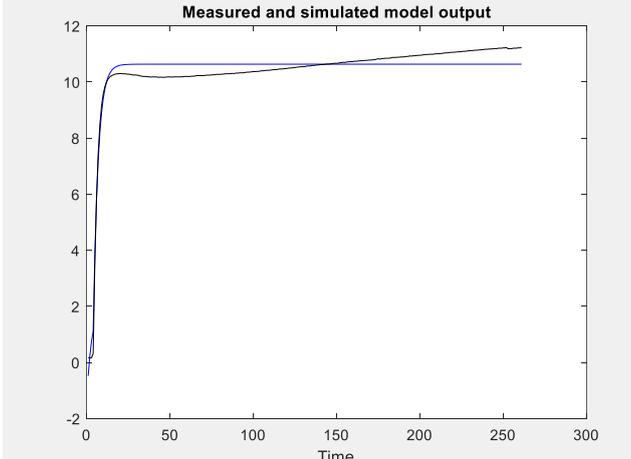
Para la obtención de datos experimentales en busca de un modelo matemático se han realizado varios ensayos. Se han conseguido datos con diferentes resultados, asimilando

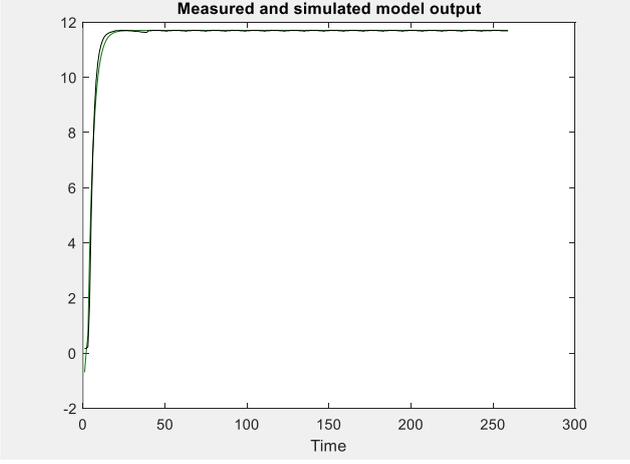
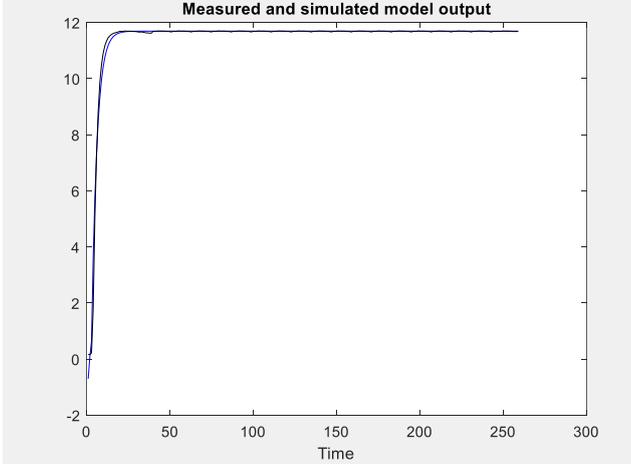
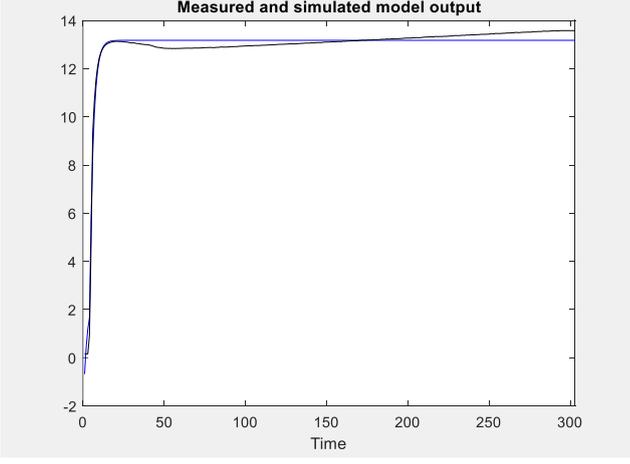
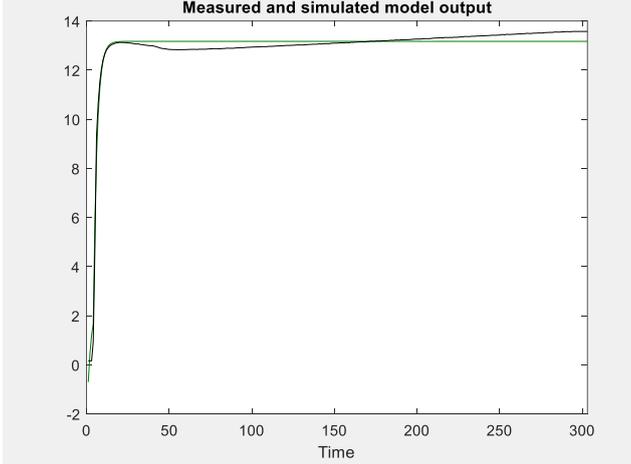
condiciones similares en todos los casos. Se realiza un resumen de los mismos con su porcentaje el cual demuestra su acercamiento al comportamiento de la planta tomando en cuenta que debe ser mayor al 80% de ajuste como se evidencia en la **Tabla 8** la representación gráfica del modelo usando *Procces Models* y *Transfer Fuction Models* y su porcentaje de similitud.

Tabla 8. Resumen de datos de experimentos

N	Modelos realizados en <i>systemIdentification</i>	
	Modelo usando <i>Procces Models</i>	Modelo usando <i>Transfer Fuction Models</i>
	 <p data-bbox="288 1155 432 1189">P1:60.68%</p>	 <p data-bbox="951 1155 1094 1189">tf1:60.68%</p>
	 <p data-bbox="288 1706 432 1740">P1:77.23%</p>	 <p data-bbox="951 1706 1094 1740">tf1:77.05%</p>

N	Modelos realizados en <i>systemIdentification</i>	
	Modelo usando <i>Procces Models</i>	Modelo usando <i>Transfer Fuction Models</i>
	 <p>P1:70.57%</p>	 <p>tf1:70.59%</p>
	 <p>P1:75.18%</p>	 <p>tf1:75.26%</p>
		

N	Modelos realizados en <i>systemIdentification</i>	
	Modelo usando <i>Procces Models</i>	Modelo usando <i>Transfer Fuction Models</i>
	P1:83.64%	tf1:83.64%
	 <p data-bbox="288 936 432 969">P1:83.06%</p>	 <p data-bbox="951 936 1094 969">tf1:83.06%</p>
	 <p data-bbox="288 1487 432 1520">P1:75.75%</p>	 <p data-bbox="951 1487 1094 1520">tf1:75.76%</p>

N	Modelos realizados en <i>systemIdentification</i>	
	Modelo usando <i>Procces Models</i>	Modelo usando <i>Transfer Fuction Models</i>
	 <p data-bbox="288 887 432 920">P1:89.51%</p>	 <p data-bbox="954 887 1098 920">tf1:89.51%</p>
	 <p data-bbox="288 1440 432 1473">P1:83.68%</p>	 <p data-bbox="954 1440 1098 1473">tf1:83.69%</p>

Se utiliza la herramienta *Poles and Zeros*, el cual encuentra la raíz en un plano cartesiano y se verifica si el sistema es estable o no.

En base a los experimentos empleados se realiza el análisis de estabilidad de cada ensayo ejecutado para la comprobación de sus raíces, se ha determinado todos los resultados en una tabla resumen que alberga y se verifica si son estables o no, **Tabla 9**.

Tabla 9. Resumen de *Poles y Zeros*

N	<i>Poles y Zeros realizados en systemIdentification</i>	
	Poles and Zeros del modelo Procces Models	Poles and Zeros del modelo Transfer Fuction Models
	Estable	Estable

En la tercera fase lleva a cabo el diseño del controlador inteligente, mediante recolección de información de sistemas de control y lógica difusa se procede a diseñar el sistema de control lazo cerrado en la herramienta *Simulink*, implementando la función de transferencia obtenida que va a simular la planta.

Se utiliza la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox* que permite realizar el diseño del controlador difuso tomando en cuentas las variables de entrada y salida, las de entrada son error de presión, el cambio de error y de salida es la corriente de apertura de válvula proporcional. Se toma en consideración las reglas difusas a diseñar y la implementación del controlador en un sistema de control para la obtención del sistema de control difuso.

A continuación, se brinda una explicación de la metodología a emplear durante esta etapa:

5.6 Obtención del controlador difuso

5.6.1 Diseño del Sistema de control borroso

Para el diseño se debe identificar las variables que entran y salen del controlador difuso, las variables lingüísticas a usar, así mismo los conjuntos difusos que se asocian a los términos lingüísticos que se van a tratar para el desarrollo del controlador, las variables del controlador difuso se las resumen en la siguiente **Tabla 10**.

Tabla 10. Variables de entrada y salida del controlador difuso

Variables del controlador difuso	
Entrada	Salida
Error o comparador de error	Corriente de apertura de válvula proporcional
Cambio de error	

En el banco de presión se plantea controlar la presión que se desea suministrar al banco de pruebas para ello se realiza un diagrama de bloques de la planta de las variables a usar, se toma como *SETPOINT* o la presión deseada que se desea controlar. La primera variable del controlador es el error o la comparación del error que verifica la diferencia entre la presión deseada y de salida realizada por la válvula proporcional.

Se utiliza una segunda entrada al controlador que denota la derivada de error verificando si llega a ser positiva o negativa. La variable de salida sería la corriente de apertura de válvula proporcional para mandar una señal de acción y pueda transitar presión al transductor y sea medida.

Para ello se establece el sistema de control cerrado que representa la planta, evidenciando la entrada de presión, el controlador difuso con las variables explicadas, la integral del error es incorporada de manera independiente para ponderar las variables de entrada y de un modo corregir los errores del controlador difuso y que envíe la variable de salida al modelo de transferencia para evaluar la presión de salida. La explicación se resume en el diagrama de la

Figura 33.

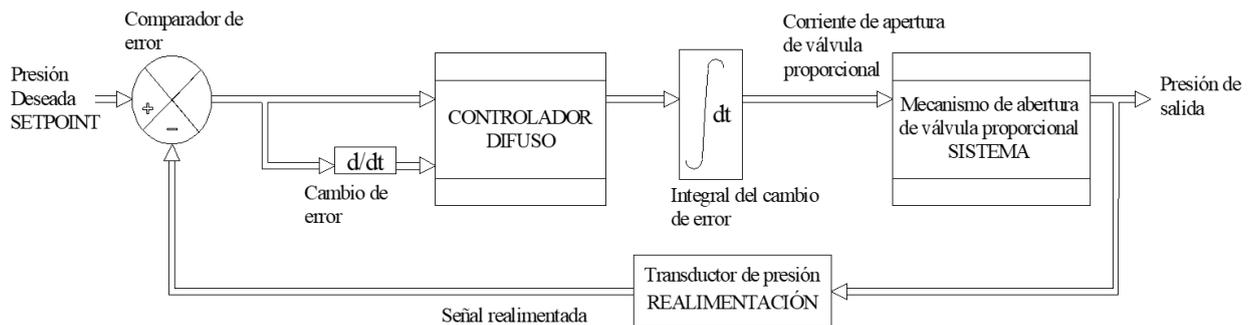


Figura 33. Diagrama de Bloques para la planta con variables de entrada y salida

Definición de sistema

La función de la aplicación es de ajustar el sistema a determinadas características como corriente a la válvula proporcional y presión en ciertos rangos en el tanque de almacenamiento, va a decidir algunas acciones dentro de la planta basándose en algunas reglas.

Variables

Entrada del sistema

- Error relativo entre *SETPOINT* y salida de presión (Presión en el tanque de almacenamiento 0-15 psi)

$$error = presión\ deseada - presión\ medida$$

- Cambio de error o derivada de error, evalúa la pendiente de error (-4 a 4)

$$cambio\ de\ error = \Delta e = error\ actual - error\ anterior$$

La variable de entrada de error relativo se encarga de cuantificar si la presión se encuentra al margen de referencia establecido, así mismo el cambio de error mide la rapidez o lentitud cambia la presión.

Salida del sistema

Considerando la corriente que se transmite a la válvula proporciona que se encuentra ubicada antes de la entrada al tanque de almacenamiento será la señal para modificar la presión asimilando a la deseada.

- Corriente de abertura de válvula proporcional (0.004-0.021 mA)

Para el diseño se utiliza la herramienta *Toolbox* de control difuso en MATLAB®, para ello en el *Command Windows* se escribe el comando *fuzzy* luego de esto abrirá una ventana frontal siendo el editor del controlador *FIS*, en este caso seleccionamos diseño de un controlador difuso *Mamdani* se puede seleccionar el número de entradas y salidas así mismo las funciones de membresía, debido que existen dos entradas al controlador se selecciona la opción *Edit* además de *Add Variable Input* se añade una nueva entrada como se observa en la Figura 34.

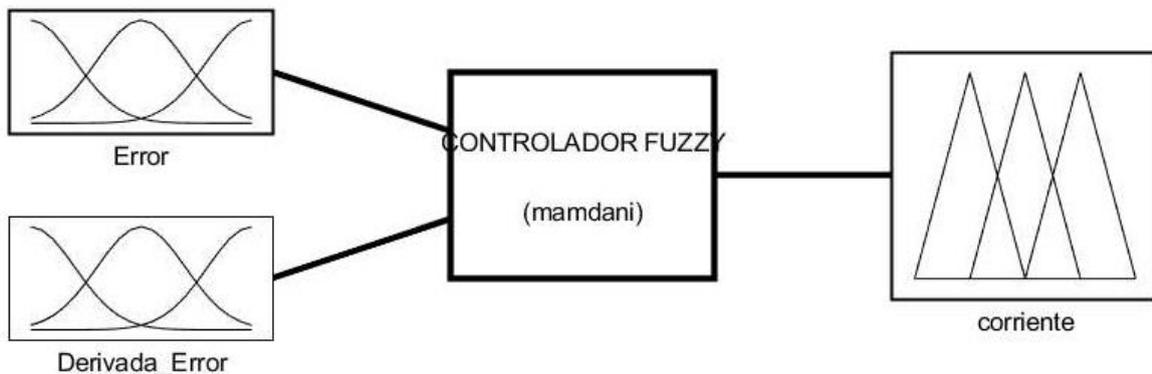


Figura 34. Editor *FIS* para el diseño del controlador, entrada el valor de error de Presión y comparador de error, salida corriente de válvula proporcional

Se ha establecido las funciones de pertenencia para la primera variable de estado del error la cual se han añadido siete de las cuales son triangulares, debido que el tanque de

almacenamiento puede soportar 15 PSI se toma un rango de -15 a 15 psi debido que puede existir un error negativo el sistema de control lo compensa para seguir a la estabilización de la respuesta. Usando definiciones como Error negativo grande, Error negativo medio, Error negativo pequeño, Error Cero, Error positivo pequeño, Error positivo medio, Error positivo grande como se indica en la **Figura 35** y la **Tabla 11**.

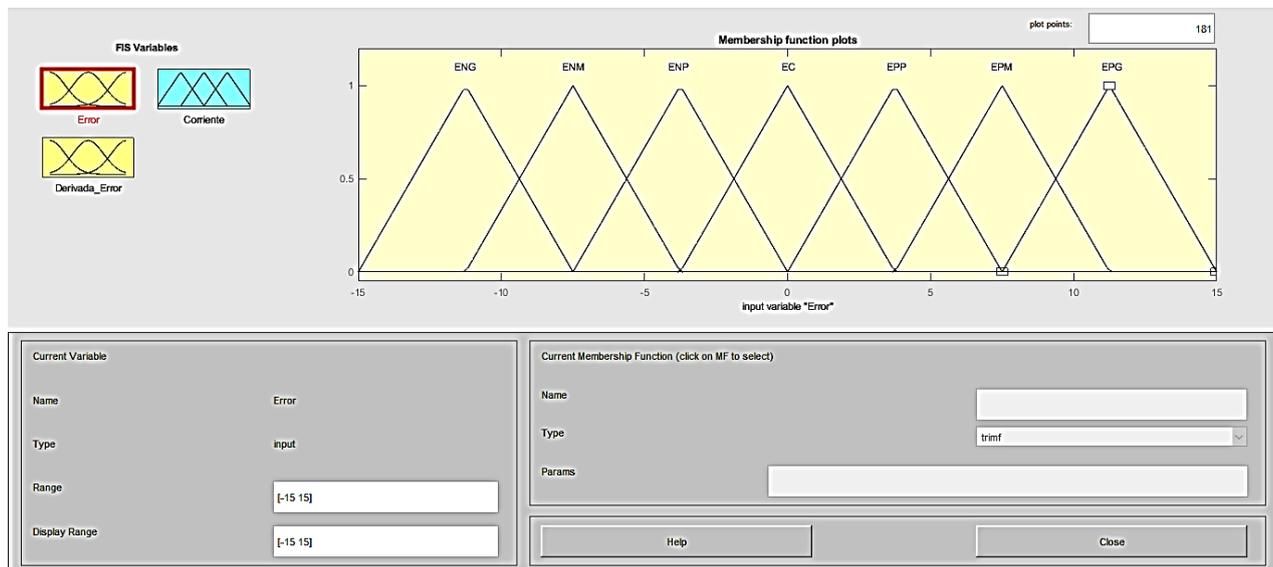


Figura 35. Funciones de pertenencia en base a la variable comparador de error

Tabla 11. Funciones de pertenencia para la presión

Función de pertenencia	Descripción	Coordenadas de la función
ENG	Error Negativo Grande	[-15 -11.25 -7.5]
ENM	Error Negativo Medio	[-11.25 -7.5 -3.75]
ENP	Error Negativo Pequeño	[-7.5 -3.75 0]
EC	Error Cero	[-3.75 0 3.75]
EPP	Error Positivo Grande	[0 3.75 7.5]
EPM	Error Positivo Medio	[3.75 7.5 11.25]
EPG	Error Positivo Pequeño	[7.5 11.25 15]

Para la segunda variable de entrada, el comparador de cambio de error o la derivada del error así como la primera se establecieron siete funciones de inferencia triangulares las cuales están dentro del rango -4 a 4 debido que los cambios de errores no son muy grandes, estos presentan errores de ± 2 bien sea cuando baja o sube, cuando la presión al inicio presenta rampas de presión o cuando baja la presión así mismo su pendiente las funciones y coordenadas se las resume en la **Figura 36** y **Tabla 12**.

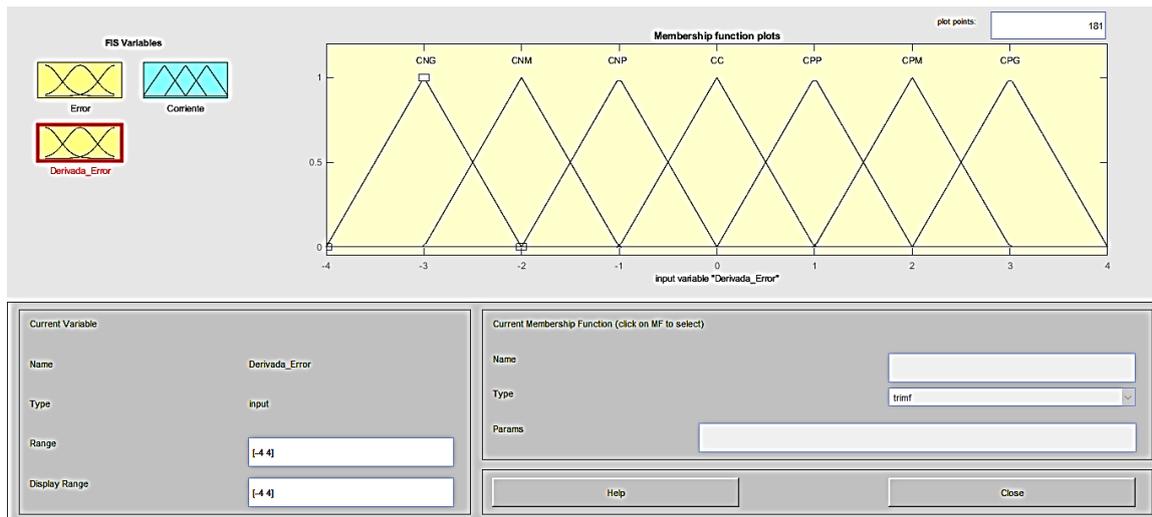


Figura 36. Funciones de inferencia para el cambio de error

Tabla 12. Funciones de pertenencia para la variable cambio de error

Función de pertenencia	Descripción	Coordenadas de la función
CNP	Cambio de error Negativo Grande	[-4 -3 -2]
CNM	Cambio de error Negativo Medio	[-3 -2 -1.001]
CNP	Cambio de error Negativo Pequeño	[-2 -1.001 0]
CC	Cambio de error Cero	[-1.001 0 0.9994]
CPP	Cambio de error Positivo Pequeño	[0 0.9994 2]
CPM	Cambio de error Positivo Medio	[0.9994 2 3]
CPG	Cambio de error Positivo Grande	[2 3 4]

Para la variable de salida del controlador, corriente de salida en la válvula proporcional, se definieron siete funciones de inferencia triangulares las cuales están dentro de un rango de (0.004 a 0.021 mA) el cual es el rango de abertura de la válvula, las funciones se usaron términos como corriente muy pequeña, corriente poco pequeña, corriente pequeña, corriente media, corriente grande, corriente muy grande y corriente mucho más grande, como se puede observar en la **Figura 37** y sus coordenadas en la **Tabla 13**.

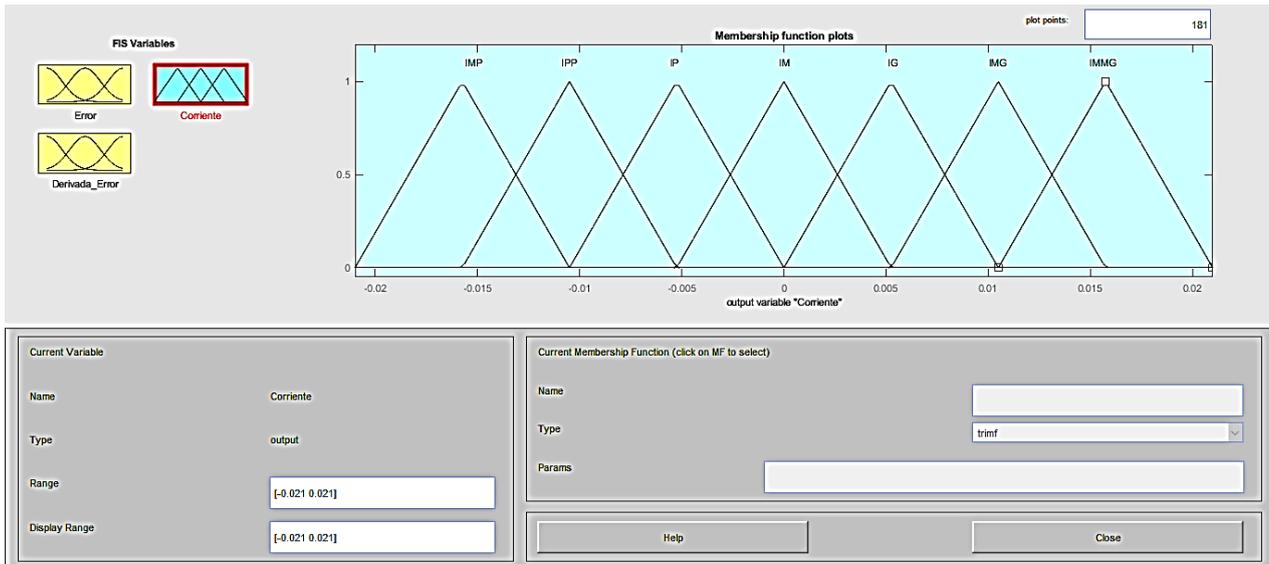


Figura 37. Funciones de inferencia para la salida, corriente de salida

Tabla 13.Coordenadas de las funciones de pertenencia para la variable corriente de salida

Función de pertenencia	Descripción	Coordenadas de la función
IMP	Corriente Muy Pequeña	[-0.021 -0.01575 -0.0105]
IPP	Corriente Poco Pequeña	[-0.01575 -0.0105 -0.00525]
IP	Corriente Pequeña	[-0.0105 -0.00525 0]
IM	Corriente Media	[-0.00525 0 0.00525]
IG	Corriente Grande	[0 0.00525 0.0105]
IMG	Corriente Muy Grande	[0.00525 0.0105 0.01575]
IMMG	Corriente Mucho Más Grande	[0.0105 0.01575 0.021]

Reglas Difusas

Una vez creadas las funciones de membresía se las describe con concordancia con las funciones teniendo relación con las otras, se realiza una tabla FAM la cual va a involucrar a todas las combinaciones posibles de las variables de inferencia. **Tabla 14**

Tabla 14. Combinaciones de las reglas difusas

Corriente de Salida	CNG	CNM	CNP	CC	CPP	CPM	CPG
ENG	IMP	IMP	IMP	IMP	IPP	IP	IM
ENM	IMP	IMP	IMP	IPP	IP	IM	IG
ENP	IMP	IMP	IPP	IP	IM	IG	IMG
EC	IMP	IPP	IP	IM	IG	IMG	IMMG
EPP	IPP	IP	IM	IG	IMG	IMMG	IMMG
EPM	IP	IM	IG	IMG	IMMG	IMMG	IMMG
EPG	IM	IG	IMG	IMMG	IMMG	IMMG	IMMG

Las reglas creadas son del tipo *IF-THEN*, oprimiendo en la pantalla *edit* y luego *Rules* para abrir un panel donde se las realiza.

IF el Error es negativo grande (ENG) AND cambio de negativo grande (CNG) THEN, la Corriente es muy Pequeña (IMP)

Estas reglas se las implementan en el controlador seleccionando la función de inferencia de acuerdo a la que está de acuerdo, para seleccionar *Add rule*, se han establecido 49 reglas como se observa en la **Figura 38**.

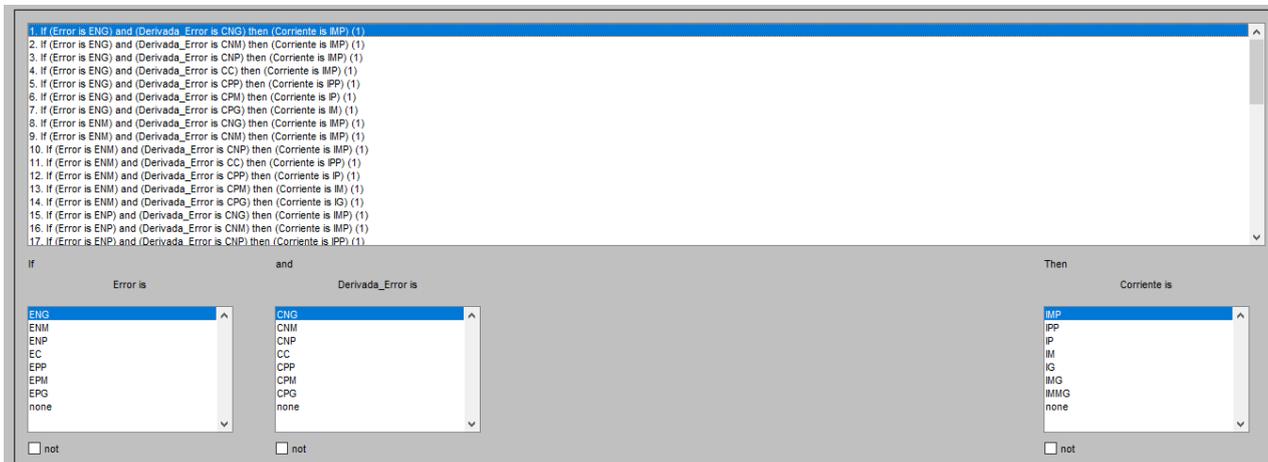


Figura 38. Reglas Difusas para el controlador

Una vez realizadas las reglas se las puede observar con la herramienta gráfica que compone la pantalla frontal se puede visualizar tanto *Rules* (Reglas Borrosas) y *Surface* que es la superficie en relación de las variables o la curva de control.

En la curva de control se refiere a la gráfica que comprende las dos variables de control la entrada vs la salida, se puede observar los universos de discurso en cuanto a los rangos y además de los valores que se puede generar. Muestra cómo las variables de entrada van a cambiar respecto a la variable de salida manteniendo todas las demás variables constantes, se puede observar en la **Figura 39**.

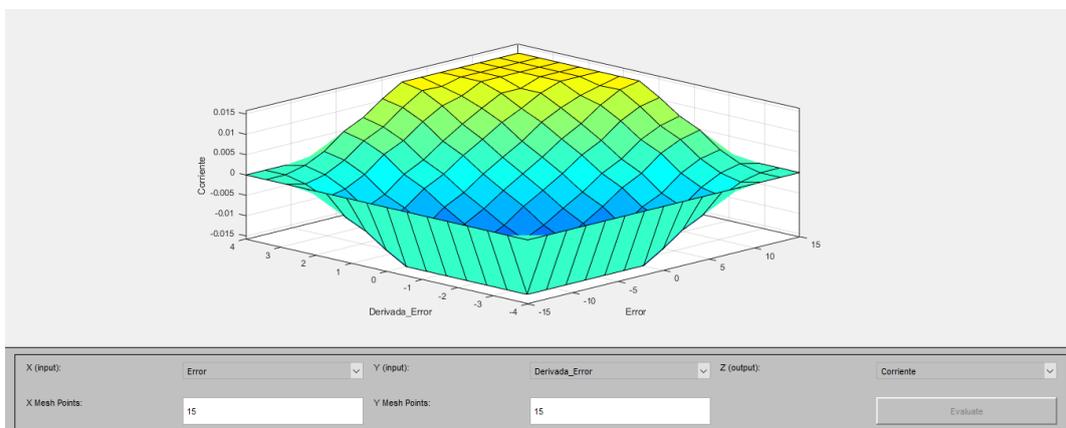


Figura 39. Curva de control de las variables

En la ventana de reglas difusas se puede apreciar el método de inferencia *Mamdani*, en la ventana se puede realizar pruebas de trabajo del controlador se puede ver los conjuntos cortados

de acuerdo a la fuzificación de las funciones de membresía, cuando se pinta de amarillo la variable de entrada se pinta las demás funciones de la otra variable, para realizar la unión de conjuntos para defusificar y mostrar el dato medio, se observa en la **Figura 40**.

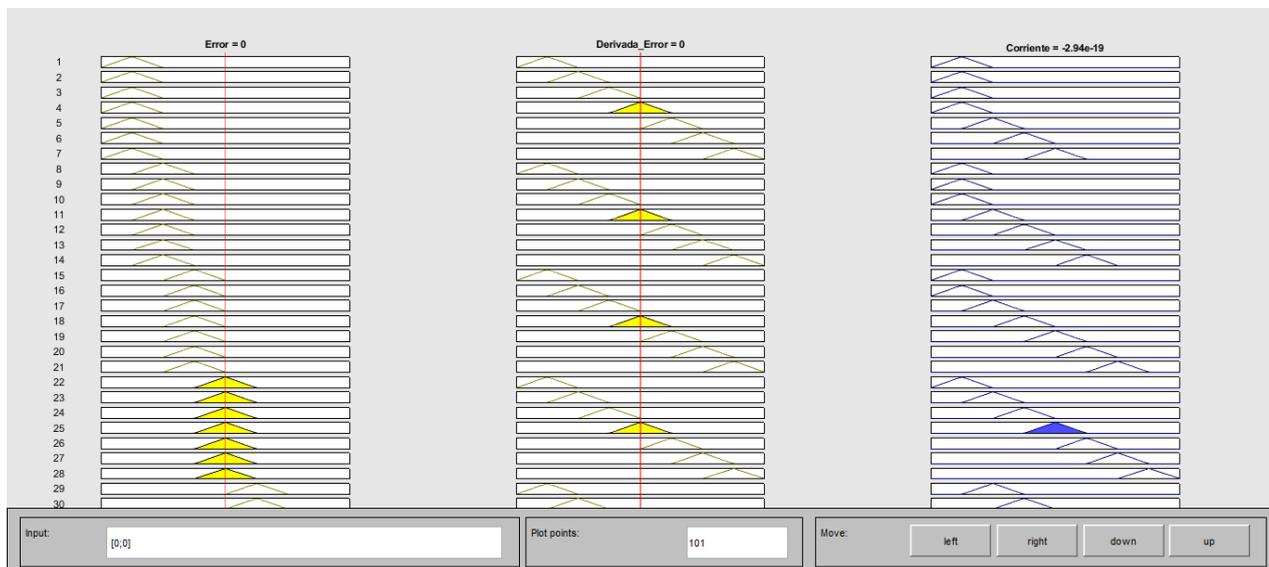


Figura 40. Reglas difusas con el método Mamdani

Al crear las reglas difusas se da por terminado el diseño del controlador difuso por lo que esta fase se puede concluir con ello.

La cuarta y última fase corresponde la simulación y la comparación del controlador inteligente difuso frente al controlador convencional PI, para ello se realiza una comparación en diferentes tiempos de trabajo, ante la presencia de perturbaciones, saltos o bajos de presión.

Lo que se pretende obtener en la fase cuatro son resultados que demuestren las diferencias de desempeño de los controladores, rapidez en la estabilización de la respuesta y tiempos de establecimiento.

Se usa la herramienta *Simulink* para el diseño de los sistemas de control, usando librerías de bloques agregando saltos de presión y perturbaciones en las respuestas del controlador para realizar las distintas comparaciones.

Una vez realizado el controlador se procede a guardar el archivo para luego ser implementado en la herramienta *Simulink* donde se implementa en el diagrama de control para las respectivas pruebas.

Se procede a abrir el entorno *Simulink*, se añade desde las librerías los iconos para diseñar el sistema, los elementos o bloques que se van a usar son:

- *Fuzzy Logic Controller* (Controlador lógico Difuso)
- *Sum* (Bloque sumador o comparador)
- *Mux* (Une señales para representarlas en la pantalla)

- *Step* (Señal de entrada al sistema o *SETPOINT*)
- *Transfer Fcn* (Bloque de función de transferencia)
- *Scope* (Graficador)
- *Derivative* (Derivada de error)
- *Saturation* (saturación de la señal)
- *Integrator* (Integrador del cambio de error) calcula la integral de la señal del error, es la suma o acumulación de la señal de error, cuanto más pase el tiempo los pequeños errores se acumulan, con esta herramienta se va a conseguir reducir el error del sistema

Los cuales se acoplan dentro del entorno para el diseño, la unión de estos elementos se representa en la siguiente **Figura 41** y **Anexo 10**.

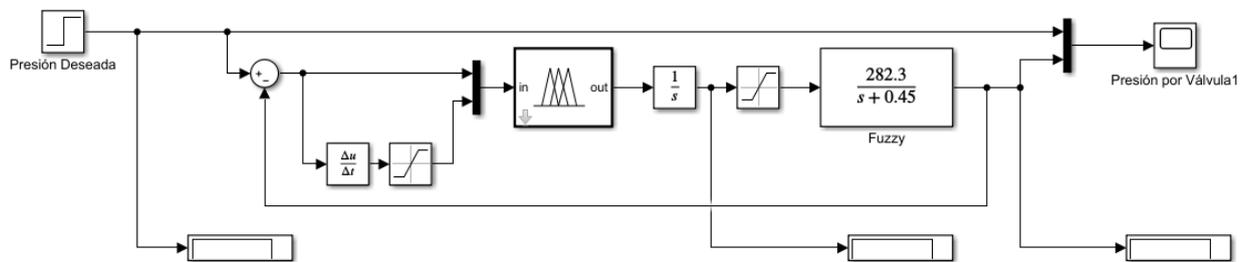


Figura 41. Diagrama de bloques implementando la función de transferencia y el controlador difuso

El *SETPOINT* es la presión de inicio que se quiere controlar por lo que los parámetros de inicio para esta variable se configuran en la ventana *Step*. Las distintas disposiciones son:

- *step time* indica cuando va a realizar el *setpoint* en un tiempo asignado
- *initial value* es el valor que se va a indicar que haga el salto
- *simple time* es la cantidad de tiempo que se quiere mantener el salto, **Figura 42**.

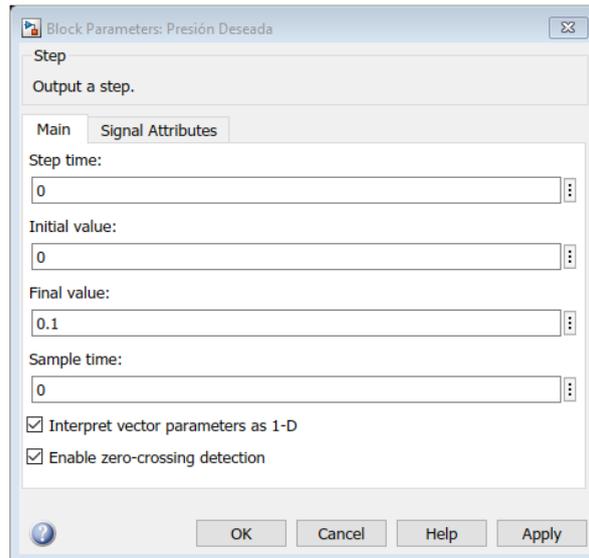


Figura 42. Configuración de *STEP*

En el sistema de control automático se encuentra el bloque del controlador difuso, para añadir el controlador elaborado se abre el bloque haciendo doble clic y en la barra que solicite el nombre del archivo FIS se ubica de acuerdo como se lo ha guardado **Figura 43.**

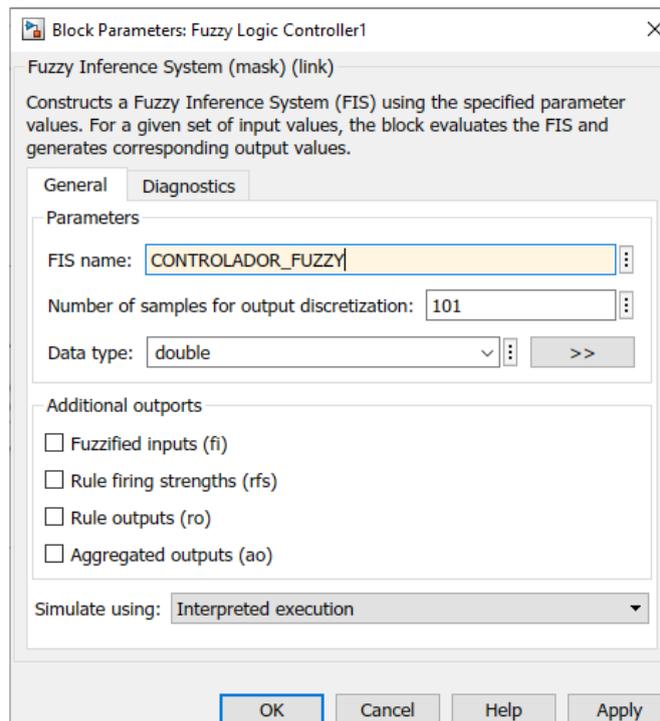


Figura 43. Configuración del bloque de controlador difuso

Para colocar el modelo de transferencia de la planta obtenido se abre el bloque *Transfer Fcn* del sistema de control para ubicar los numeradores y denominadores de la fórmula, en la

parte de *numerator coefficients* se añade solamente el valor del numerado, mientras que para *Denominator coefficients* se añade los valores del denominador, **Figura 44.**

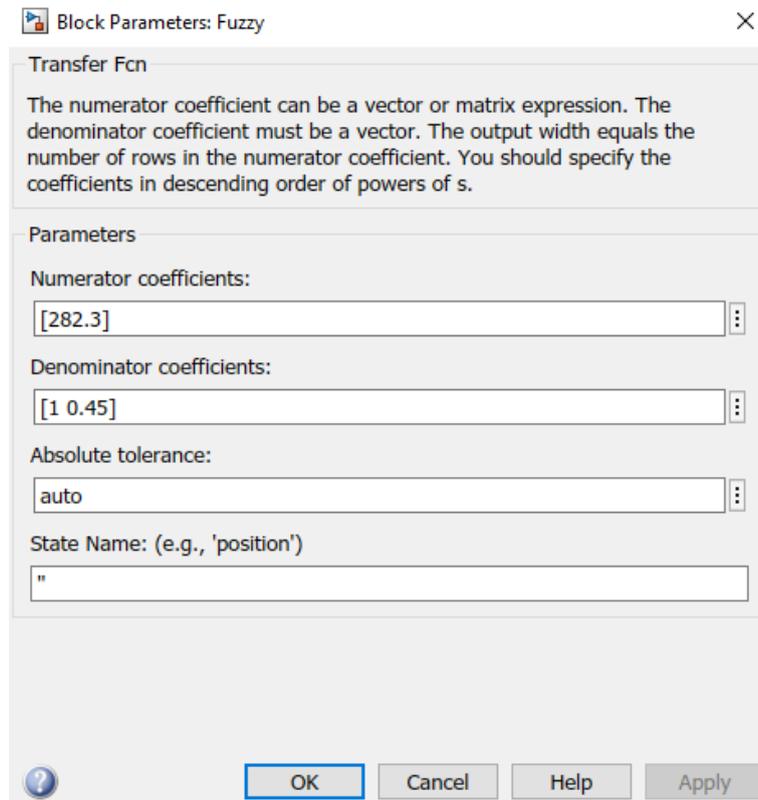


Figura 44. Configuración de la función de transferencia

Para la saturación de datos se utiliza el bloque *Saturation* el cual va a tener una acotación de valores superior e inferior dando una señal entre esos límites, el saturador limita la salida del controlador para evitar daños en el sistema o valores fuera de límites seguros reduciendo el impacto de señales anómalas, en cuanto al bloque del derivador y el integrador se utiliza ese bloque, se puede configurar los límites seleccionando el mismo abriendo un panel frontal de configuración

5.7 Simulación del Controlador

El bloque *Step* es el encargado de generar un escalón para un sistema de control en este caso la planta puede soportar desde 0 a 15 PSI, por lo cual una vez establecido el valor de presión deseado el bloque *Scope* permite la representación gráfica de la simulación del controlador frente a una señal, usando la herramienta *Run* donde permite realizar la experimentación del sistema de control.

Para un ejemplo de aplicación se establece una presión deseada de 11 PSI en el *SETPOINT* el cual se evalúa el error en un bloque sumador al entrar al controlador, el mismo que envía la señal de salida de corriente de abertura de la válvula proporcional desde 0.004 a 0.021

mA hasta poder generar la señal adecuada de abertura de la válvula para que se establezca en la presión deseada **Figura 45**.

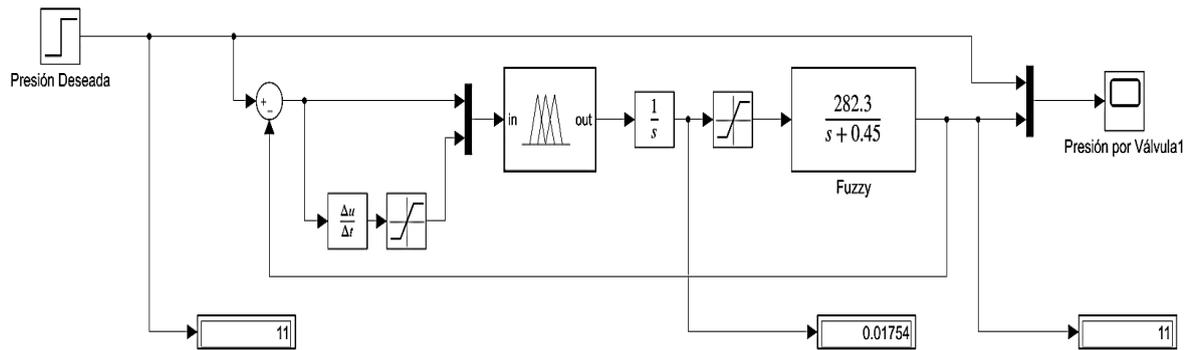


Figura 45. Sistema de control difuso simulado

Para la comparación del controlador convencional y el difuso se realiza el diagrama de control del controlador a comparar en el entorno *Simulink*, añadiendo la librería PID y el bloque *Transfer Fcn*.

Mediante simulación de desempeño entre ambos en la herramienta *Simulink* de MATLAB®, se toma relación ante una señal de presión de entrada de 11 PSI, los controladores trabajan para entregar una respuesta adecuada a la señal, presentan datos los controladores obteniendo una similitud de respuestas con diferente curva de salida del controlador, **Figura 46 y Anexo 12**.

Anexo 12.

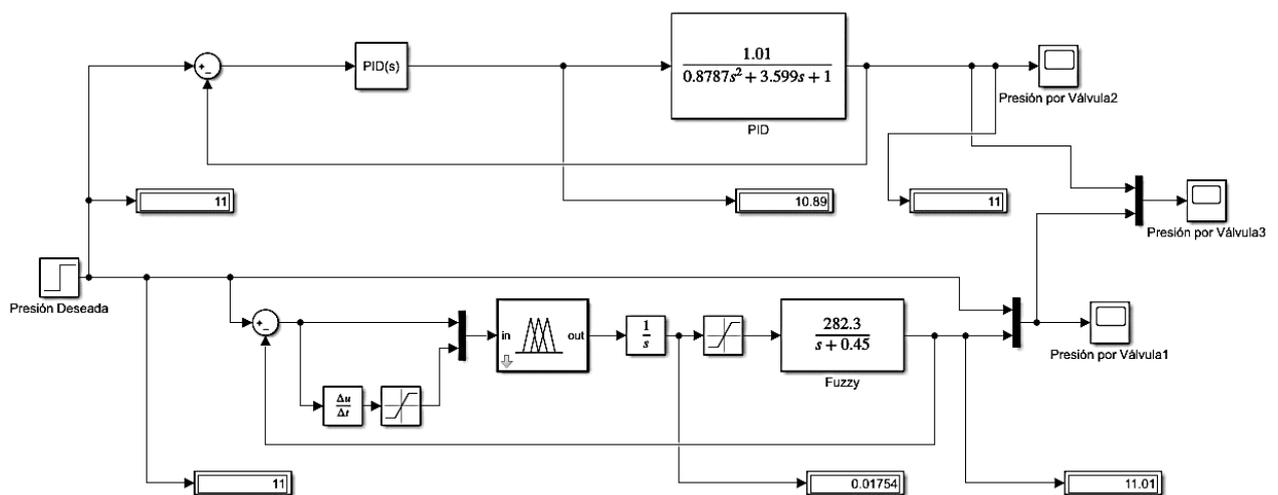


Figura 46. Sistemas de control inteligente y convencional PI

Para la revisión de comparación grafica se unifica las salidas de los controladores en una sola usando un *Scope* que permite visualizar la comparación, como en diferentes ensayos de comparación.

- **Ensayos de pruebas de los controladores ante perturbaciones**

Se realiza la verificación de respuesta de los controladores ante el ingreso de una perturbación al sistema, simulando una fuga de aire o una sobrecarga en el banco de presión, así mismo se simula frente a un ciclo de trabajo que varía presiones deseadas. Ante la presión de salida se implementan perturbaciones virtuales simulando a la realidad en el controlador inteligente y convencional a fin de verificar diferencias y establecimiento de señales **Figura 47**.

Las perturbaciones y el ciclo de trabajo se implementan desde *Simulink Library Browser* usando:

Repeating Sequence Stair genera señales escalera en una secuencia, asimilando el ciclo de trabajo en la planta en donde se van a requerir distintas presiones de entrada

Random Number genera números aleatorios distribuidos entre la media y la varianza, simulando la realidad en donde existan perturbaciones en el funcionamiento del banco (media = 0.001 y varianza =0.01).

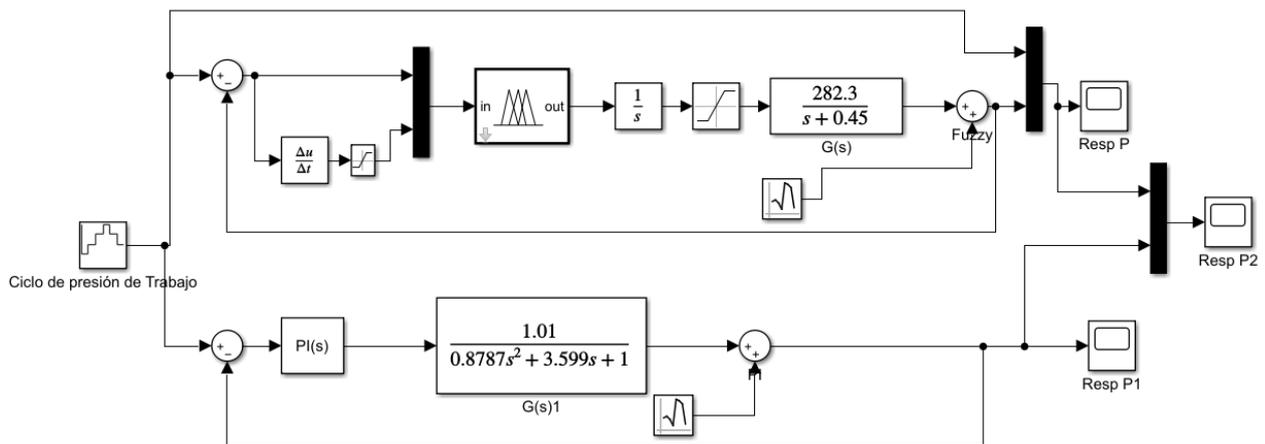


Figura 47. Sistema de control Difuso y Convencional PI al tener perturbaciones

- **Ensayos de pruebas de los controladores ante saltos**

Así como el ingreso de una perturbación al sistema, se simula saltos o bajas de presión que pueden existir en el banco de presión, en un ciclo de trabajo de presiones, diferenciando las respuestas y trabajo, se ha añadido en la salida de presión un bloque sumador que va a simular subidas de presión, así como una bajada de presión, usando dos bloques *Step* **Figura 48**.

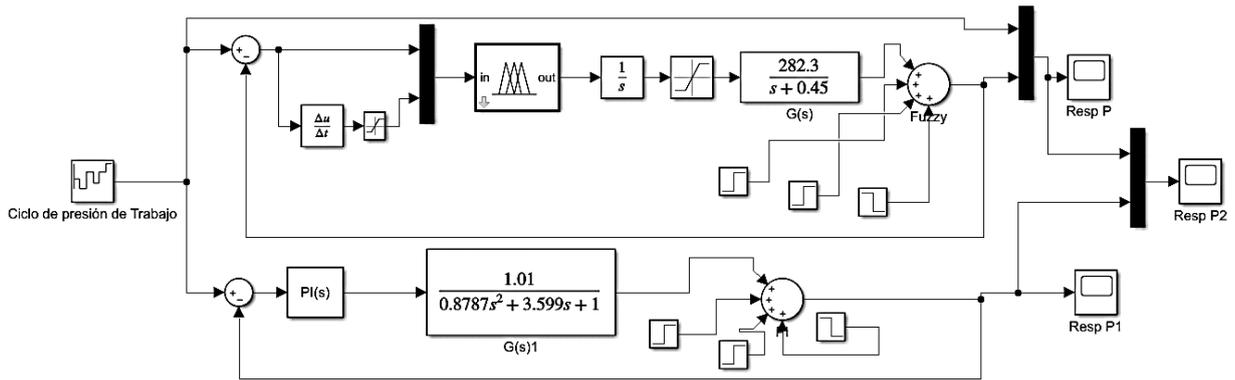


Figura 48. Sistema de control Difuso y convencional Pi ante saltos o bajos de presión

- **Ensayo de pruebas de los controladores ante perturbación y salto**

Se realiza un ensayo al existir una subida de presión así mismo cuando existen perturbaciones en la respuesta, se implementa un bloque sumador donde se conecta junto a un bloque *Step* y un bloque *Random Number*, **Figura 49.**

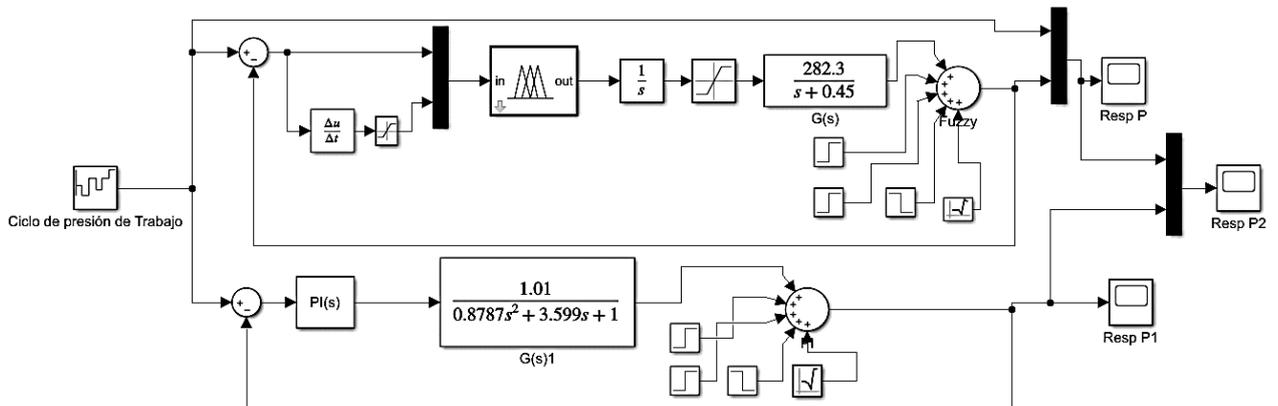


Figura 49. Sistema de control Difuso y convencional Pi ante salto de presión y perturbaciones

6 Resultados

4.1 Adquisición de Datos

Durante la segunda fase, se obtuvieron múltiples conjuntos de datos de la planta mediante diversas tomas de medición a fin de buscar el modelo matemático. Estos datos se resumen en dos vectores distintos (entrada y salida), cuya representación gráfica se muestra en la **Figura 28** a modo de ejemplo y utilizando un editor de texto plano, **Figura 50**

DATOS SENSOR (SALIDA)		DATOS VÁLVULA (ENTRADA)	
TIEMPO	DATO	TIEMPO	DATO
0	0.16452	0	0.004
1	0.16452	1	0.004
2	0.16452	2	0.004
3	0.16452	3	0.004
4	3.584	4	0.021
5	6.11245	5	0.021
6	7.8625	6	0.021
7	9.01631	7	0.021
8	9.76712	8	0.021
9	10.2033	9	0.021
10	10.4903	10	0.021
11	10.6559	11	0.021
12	10.7388	12	0.021
13	10.794	13	0.021
14	10.8105	14	0.021
15	10.8326	15	0.021
16	10.8271	16	0.021
17	10.816	17	0.021
18	10.7995	18	0.021
19	10.7719	19	0.021
20	10.7553	20	0.021
21	10.7222	21	0.021
22	10.6891	22	0.021
23	10.6449	23	0.021
24	10.5897	24	0.021
25	10.5511	25	0.021
26	10.5014	26	0.021
27	10.4517	27	0.021
28	10.402	28	0.021
29	10.3578	29	0.021
30	10.3192	30	0.021
31	10.275	31	0.021
32	10.2419	32	0.021
33	10.1977	33	0.021

Figura 50. Datos tomados del transductor de presión y de la válvula proporcional

4.2 Modelo Matemático

En la selección de la fórmula que represente a la planta se realiza por la comprobación de Poles y Zeros y además del porcentaje de ajuste del modelo sea superior al 80%, los distintos experimentos se realiza una comparación de resultados, resumiendo que el modelo N°9 usando *Transfer Fuction Models* posee un ajuste de 83.69 %, como se evidencia en la

Figura 51 y la ecuación 30.

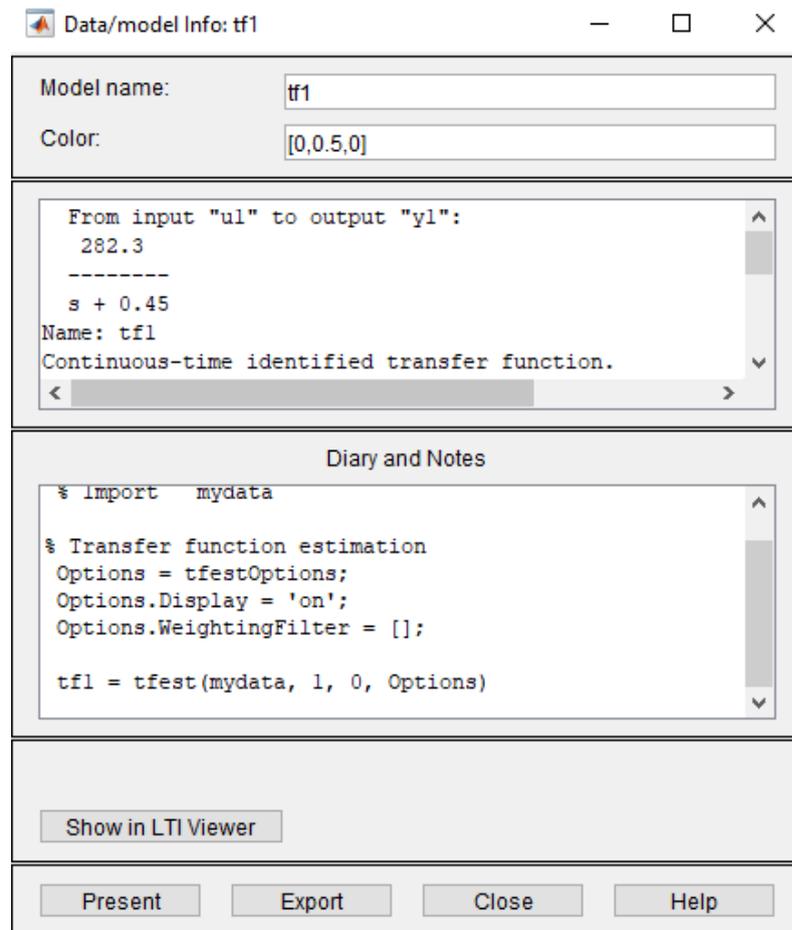


Figura 51. Ecuación del modelo de transferencia

$$G(s) = \frac{282.3}{s + 0.45} \quad \text{Ecuación (30)}$$

4.3 Controlador Difuso

Establecido el modelo matemático se procede al diseño y creación del controlador difuso para que la planta tenga mejor respuesta con un gasto de energía menor, esto se procede a guardar el archivo del controlador creado para luego ser implementado en la herramienta *Simulink* donde se implementa en el diagrama de control para las respectivas pruebas y comparación de desempeño (ver Figura 45).

En la presente figura muestra la respuesta del controlador ante una señal escalón de 11 PSI, asumiendo una respuesta suave **Figura 52** y **Anexo 11**.

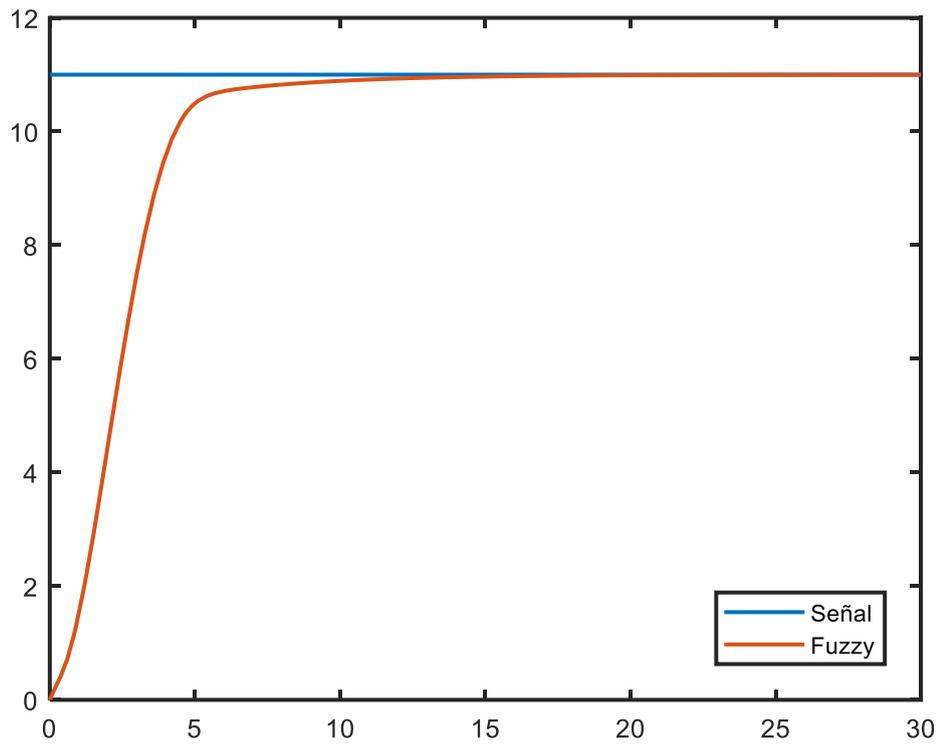


Figura 52. Respuesta del controlador ante un *SETPOINT*

4.4 Comparación entre control Inteligente y control convencional

Mediante simulación de desempeño entre ambos en la herramienta *Simulink* de MATLAB®, se toma relación ante una señal de presión de entrada de 11 PSI, los controladores trabajan para entregar una respuesta adecuada a la señal, presentan datos los controladores obteniendo una similitud de respuestas con diferente curva de salida del controlador **Figura 53.**

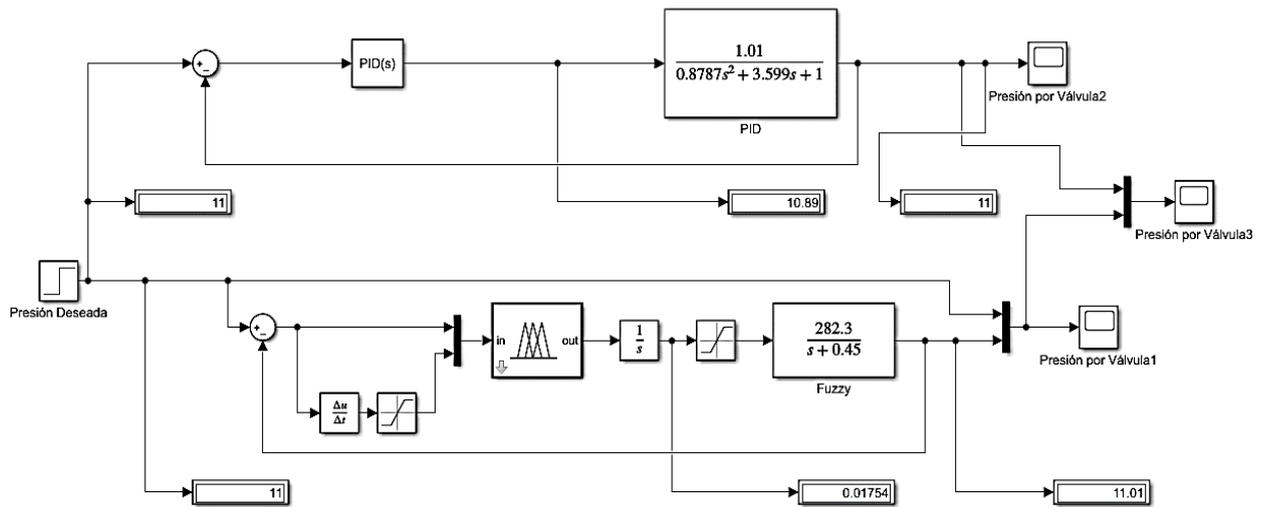


Figura 53. Sistemas de control inteligente y convencional PI

Para la revisión de comparación grafica se unifica las salidas de los controladores en una sola usando un *Scope*, se puede observar que el controlador Difuso demuestra mejor respuesta ante el *SETPOINT* con una resolución suave y estabilización rápida a comparación del controlador convencional se puede observar en la **Figura 54** y **Anexo 13**.

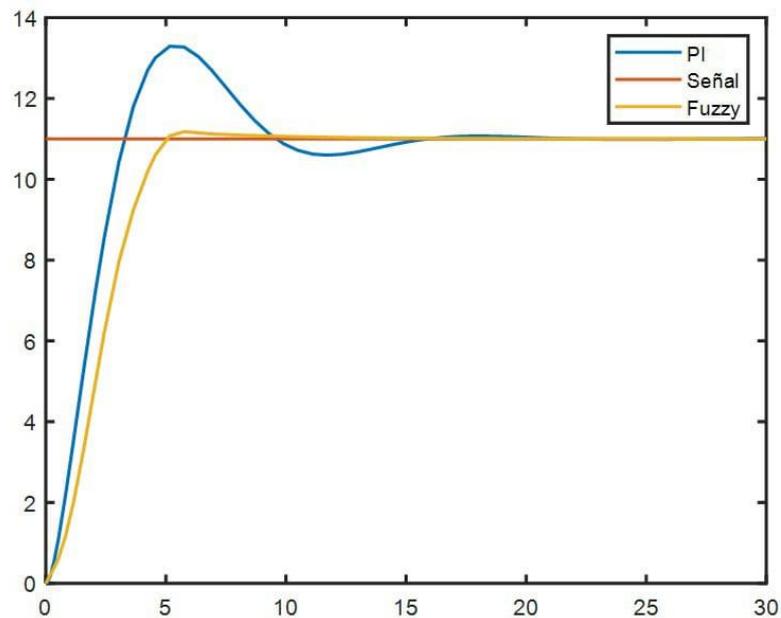


Figura 54. Comparación de salidas graficas de controladores

La simulación se ha realizado en un tiempo de 30 s, para lo cual se puede evidenciar las respuestas graficas de los controladores los cuales se puede evidenciar las características y el análisis de la respuesta es una tabla comparativa, los tiempos de subida, el Overshoot que se refiere al máximo valor pico de la curva de respuesta. **Tabla 15**

Tabla 15. Comparación de respuesta de señales de controlador PI y Difuso

	PI	FUZZY
Rise time (tiempo de subida)	3.627 s	4.986 s
Overshoot (%)	13.068 %	1.531 %
Settling Time (Tiempo de asentamiento)	19.003 s	18.338 s

- **Ensayos de pruebas de los controladores ante perturbaciones**

La representación gráfica muestra las perturbaciones en las respuestas de los controladores que a pesar que existen se pueden establecer e irse estableciendo de acorde a las presiones de entrada requeridas, el controlador PI en su entrada al rango de trabajo de presiones de 7, 3, 9, 5, 9 y 12 PSI muestra un pico o salto que luego va ser estabilizando en un poco tiempo, a diferencia del difuso no presenta un salto su elevación es suave hasta poder llegar a estabilizarse y estar referido al valor **Figura 55**.

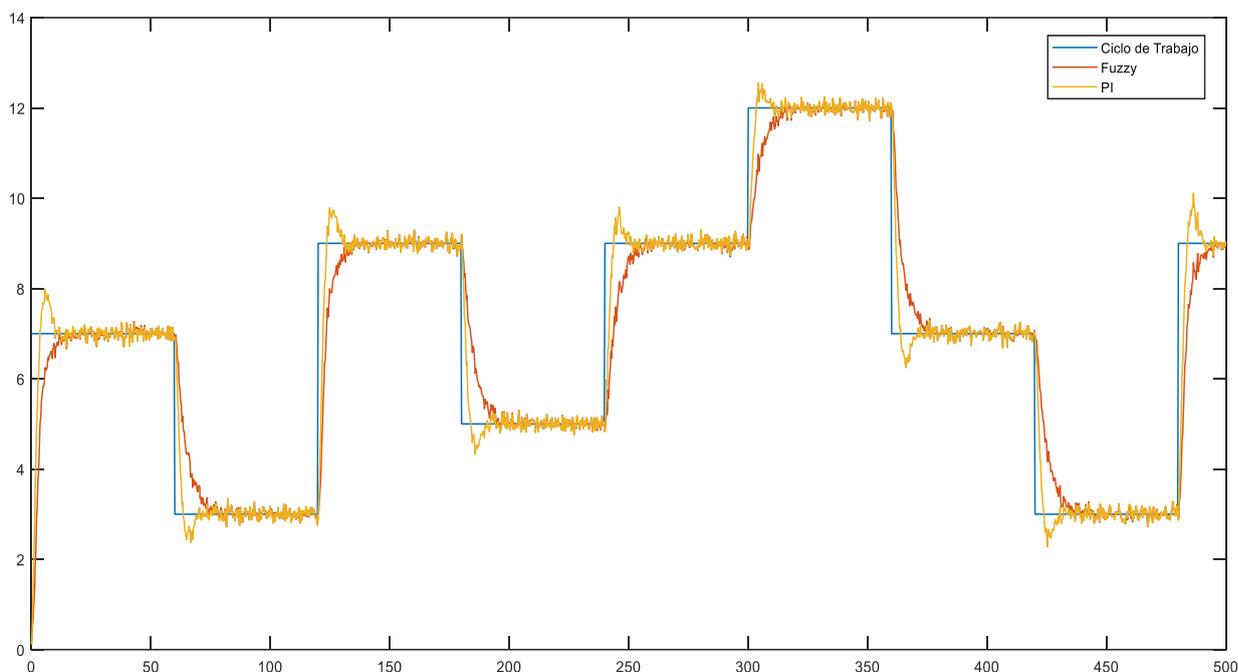


Figura 55. Representación gráfica de respuestas de controladores ante perturbaciones

- **Ensayos de pruebas de los controladores ante saltos**

En la representación gráfica se puede observar que, en el rango de trabajo de 7, 3, 9 y 5 PSI, en el tiempo de 40 segundos de simulación existe un salto de presión de 2 PSI, en los 100 segundos consta un bajo de presión de -2 PSI, así también a los 170 segundos existe una subida de presión de 2 PSI, el sistema PI tiene una entrada más rápida y agresiva que en comparación del difuso es suave y se estabiliza casi al mismo tiempo que el convencional **Figura 56**.

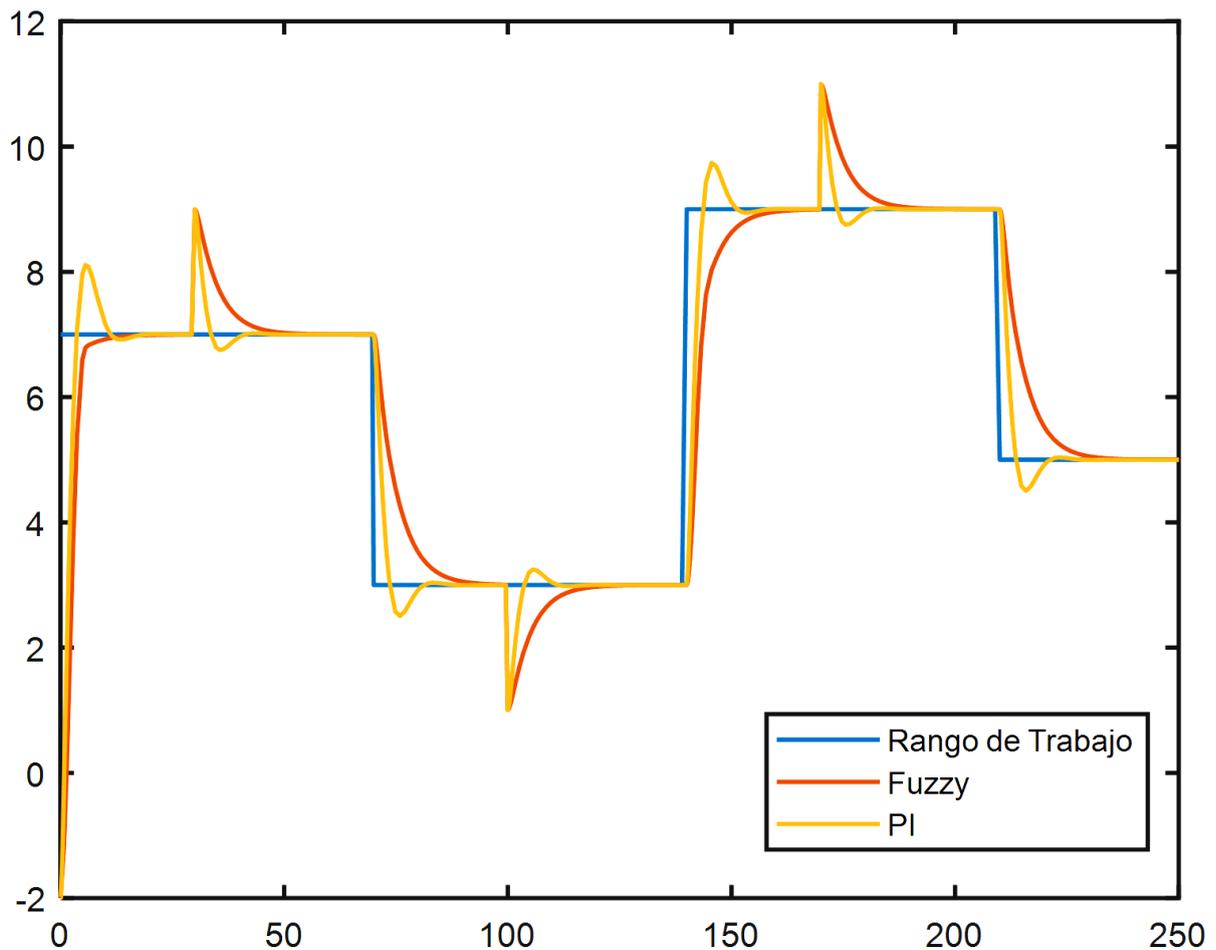


Figura 56. Representación gráfica de respuestas de controladores ante subida y bajo de presión.

- **Ensayo de pruebas de los controladores ante perturbación y salto**

Se puede seguir observando en la **Figura 57**, el controlador PI es agresivo en el salto de presión y las perturbaciones, en comparación del difuso, así mismo existe una estabilización idéntica de ambos controladores con la diferencia que el difuso es más suave de respuesta que el convencional, en el brinco de presión se implementó los mismos saltos también bajos anteriores y la perturbaciones de media de 0.001 y varianza de 0.01 así como el rango de trabajo de 7, 3, 9 y 5 PSI **Figura 57**.

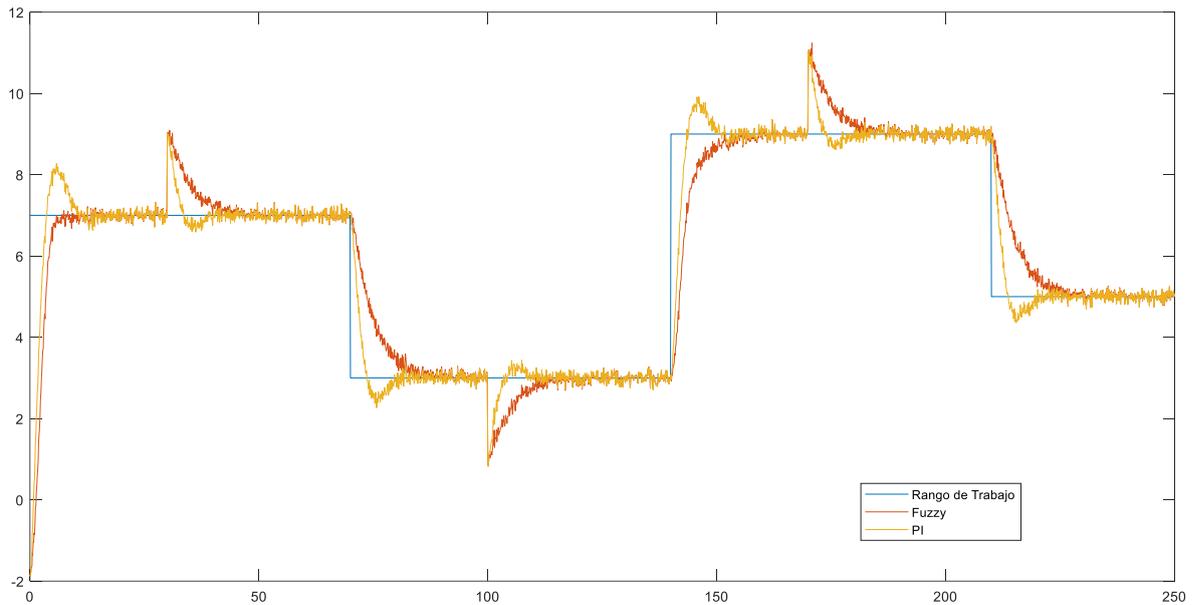


Figura 57. Representación gráfica de respuestas de controladores ante subida de presión y perturbaciones

Se ha realizado un resumen de la comparación de desempeño de los controladores evidenciando los saltos y bajos cuál es su rapidez y suavidad para reestablecerse al rango de trabajo, los datos obtenidos se los resumen en la siguiente **Tabla 16**.

Tabla 16. Comparación de desempeño de controladores frente a altos y bajos de presión.

Resultados de la comparación entre el controlador convencional PI y difuso				
Controlador	Convencional PI		Difuso	
	Tiempo de subida 90%	Tiempo de asentamiento	Tiempo de subida 90%	Tiempo de asentamiento
	- 1 salto de presión - 1 bajo de presión - 2 salto de presión			
Comparación ante saltos y bajos de presión	- 33 s - 103.137 s - 172 s	- 55.690 s - 118 s - 188.398 s	- 40 s - 111 s - 194 s	- 54 s - 123.369 s - 190 s

7 Discusión

En el presente trabajo se planteó desarrollar un sistema de control inteligente para el banco de medición y control de presión. Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo tareas específicas que se plantearon en la investigación.

Se llevó a cabo la identificación experimental de sistemas con el objetivo de obtener un modelo matemático preciso. Para ello, se realizaron ensayos de recolección de datos utilizando el software LabVIEW, el cual cuenta con un archivo VI de adquisición de datos. Posteriormente, se utilizó la herramienta "ident" de MATLAB® para llevar a cabo estimaciones y validar el modelo que mejor se ajusta a la planta

Se obtuvo una función de primer orden con un porcentaje de ajuste de 83.69%, el resultado efectuado por Ramos et al. (2015) consiguió un modelo matemático de primer orden con un ajuste de 86.73% en su investigación; por otra parte, el investigador Tandazo et al. (2014) desarrolló un modelo matemático de segundo orden con un ajuste del 88.38%.

La investigación realizada y los estudios de los investigadores describen que un modelo debe ser > 80% de ajuste para ser considerado suficientemente preciso, así mismo debe ser estable satisfaciendo que el modelo matemático que se obtuvo cumple con estas dos restricciones y es apto.

Para el diseño del controlador difuso se definió dos variables de entrada (error y comparador de error) y una de salida (corriente de abertura), cada variable contiene siete funciones de pertenencia ordenadas dentro de un rango, las funciones pueden ser “error negativo grande”, “error negativo pequeño”, “error negativo medio”, “error cero”, entre otros.

Las funciones de pertenencia están relacionadas dentro de un conjunto de reglas difusas las cuales modelan y controlan el sistema de las cuales se han creado cuarenta y nueve reglas para el manejo y desempeño del controlador difuso, es necesario un conocimiento experto del sistema y las variables que afectan a la planta.

En el estudio realizado por Tandazo et al. (2014), se desarrolló un controlador convencional PI utilizando algoritmos de control para sintonizar las ganancias PI y ajustarlo a la señal escalón. En contraste, Ramos et al. (2015) diseñó un controlador predictivo basado en modelo (MPC), el cual implica un mayor conocimiento en su diseño que el controlador convencional PI. Este controlador estableció restricciones de entrada y salida (corriente de apertura y cierre de válvula) y utilizó dos entradas (perturbaciones medidas y no medidas) y una salida (variables manipuladas) para predecir las respuestas del sistema ante futuras entradas del controlador.

Los estudios realizados por investigadores anteriores indican que el diseño de sus controladores no requiere un gran esfuerzo en la configuración de variables o parámetros en el sistema de control. Sin embargo, el diseño del controlador difuso es más completo en cuanto a estimaciones reales, el uso de términos de lenguaje común, que son fácilmente comprensibles para cualquier investigador, y la

interpretación de resultados, así como los ajustes necesarios para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

En la representación gráfica de los resultados obtenidos en el desempeño de los controladores (ver **Figura 54**), se puede observar que el controlador difuso presenta una respuesta suave, con un tiempo de subida de 4.986 s y un tiempo de asentamiento de 18.338 s. En contraste, el controlador convencional presenta un tiempo de subida de 3.627 s y un tiempo de asentamiento de 19.003 s. Además, la respuesta del controlador difuso ante la señal escalón se estabiliza suavemente, sin presentar saltos bruscos (ver **Figura 52**).

En la simulación realizada en el estudio de Tandazo et al. (2014), se observó que el controlador convencional PI presenta una respuesta inicial brusca que se estabiliza después de los primeros segundos, con un tiempo de subida de 3.769 s (ver **Figura 46**).

Se llevaron a cabo pruebas de perturbaciones y saltos de presión para analizar el comportamiento de respuesta de los controladores en un rango de trabajo determinado. En las pruebas de perturbaciones, se observó que ambos controladores alcanzaron el mismo nivel de asentamiento. Sin embargo, se pudo notar que el controlador difuso presenta una estabilización más suave en comparación con el controlador convencional, que muestra un salto brusco en la respuesta (ver **Figura 55**).

En el ensayo de saltos de presión se puede observar que los tiempos de establecimiento de ambos controladores son prácticamente iguales tanto en la bajada como en la subida de presión. Sin embargo, el controlador difuso muestra una mayor suavidad en su respuesta, lo que resulta en un menor consumo de energía para el control del sistema (ver **Figura 56**).

Se realizó un ensayo mixto que combinó tanto perturbaciones como saltos de presión, en el cual se puede observar que la diferencia en los tiempos de asentamiento entre ambos controladores es pequeña, siendo el controlador convencional PI ligeramente más rápido. Sin embargo, el controlador difuso se destaca por su capacidad para generar una respuesta suave y sin saltos bruscos, lo que le permite trabajar de mejor manera en comparación con el controlador convencional (ver **Figura 57**).

Se compararon los resultados numéricos y gráficos obtenidos con el controlador convencional PI para evaluar su desempeño y resultados. Los resultados indicaron que el controlador difuso ofrece una respuesta más suave y menos agresiva que el convencional, lo que demuestra su superioridad en estas situaciones (ver **Tabla 16**).

8 Conclusiones

- Mediante el análisis y la experimentación se logró encontrar un modelo matemático de primer orden estable, con un porcentaje de ajuste del 83.69%. Este resultado es el más ideal en comparación a los demás ensayos de obtención de modelos matemáticos, lo que sugiere que el modelo puede ser utilizado con mayor confianza y precisión.
- El diseño y la implementación de un controlador inteligente difuso en MATLAB® ha demostrado ser una alternativa eficaz para el control de sistemas de presión. En comparación con el controlador PI, el controlador difuso ha mostrado una respuesta más rápida con un tiempo de 18.338 segundos. Además, su capacidad para producir una respuesta suave a las señales de presión deseada ha demostrado que existe un menor consumo de energía en el control del sistema. Estos resultados muestran que el controlador difuso es una herramienta valiosa en la optimización del control de sistemas de presión en una amplia gama de aplicaciones.
- El análisis comparativo del desempeño de un controlador difuso y un controlador convencional PI ante perturbaciones, saltos y bajos de presión, ha mostrado que el controlador difuso es capaz de ofrecer una respuesta rápida y suave en todas las situaciones de prueba. Además, este controlador demostró una suavidad excepcional en su respuesta, incluso cuando se enfrentaba a perturbaciones o saltos de presión en la salida. Por otro lado, el controlador PI mostró un comportamiento menos estable, especialmente en situaciones de perturbación. Estos resultados sugieren que el controlador difuso es una herramienta valiosa para el control de procesos industriales y que su uso puede mejorar significativamente la eficiencia y la precisión del control de sistemas de presión

9 Recomendaciones

- Para mejorar la obtención de datos y experimentos de presión en el banco, se recomienda implementar módulos PLCs, sensores y válvulas de alta precisión para mejorar la eficacia del trabajo. Además, la inclusión de nuevos dispositivos como otro tanque de almacenamiento y una interfaz HMI sería de gran ayuda para visualizar el control del banco y obtener una mayor precisión en los datos recolectados. La implementación de estos nuevos elementos permitiría una mayor flexibilidad en el control y el monitoreo del banco, lo que permitiría a los operadores tomar decisiones informadas y realizar ajustes en tiempo real. Por lo tanto, la adopción de tecnologías modernas y de alta precisión en el banco mejoraría la calidad de los experimentos y permitiría obtener resultados más precisos y confiables.
- Se sugiere que, con el fin de evaluar de manera más completa y precisa el desempeño del controlador difuso, se implementen módulos actualizados como PLC para realizar prácticas de comparación con el controlador PI, PD y PID. Esto permitiría una evaluación más completa de los controladores y de su capacidad para controlar el sistema en cuestión. Además, la inclusión de estos módulos permitiría una mayor flexibilidad en la realización de experimentos y ajustes en tiempo real, lo que permitiría una evaluación más precisa y detallada del desempeño de los controladores.
- Se sugiere que, dado el estudio de los controladores inteligentes es amplio, existen aún más tipos de control, como redes neuronales, redes petri, sistemas expertos y algoritmos genéticos, lo se recomienda continuar investigando y evaluando la eficacia de estos controladores en diferentes situaciones y sistemas para comprender mejor su funcionamiento y mejorar su aplicación en la industria y la ingeniería. Asimismo, se sugiere que se realicen comparaciones entre los diferentes tipos de controladores inteligentes para determinar cuál es el más adecuado para cada situación y sistema específico. En resumen, se recomienda que se continúe investigando y mejorando la implementación de los diferentes tipos de controladores inteligentes para futuras investigaciones, lo que podría tener importantes implicaciones en la eficiencia y precisión del control de procesos en diversos campos de la industria y la ingeniería.

10 Bibliografía

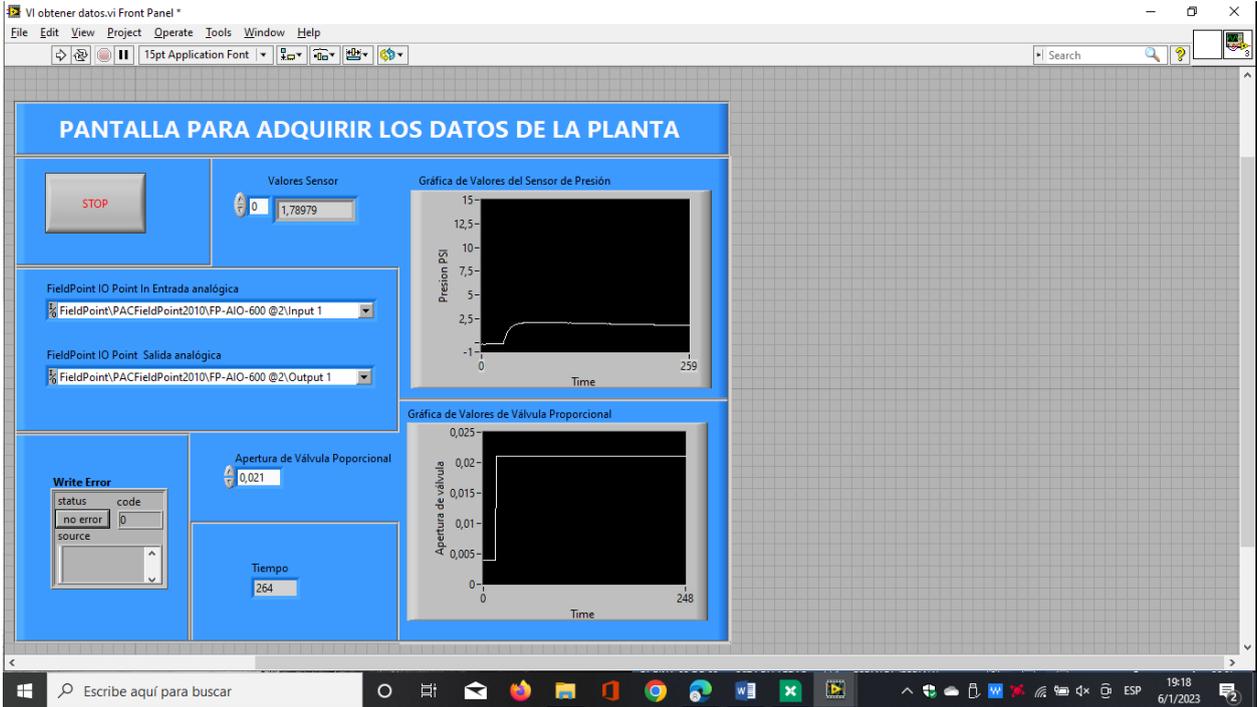
- Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2013). *PID control system analysis design, and technology IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Escocia: University of Glasgow.
- Aranda Arizmendi, A. (2018). *Predicción del caudal volumétrico utilizando redes neuronales artificiales*. Morelos, México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Argüelles Hernández, J. R. (2016). *Modelado de sistemas físicos*. Mexico: Universidad Politécnica del Centro.
- Caramillo Ramos, M. A. (2017). *Práctica #11. Adquisición y análisis de datos en LabVIEW*. Baja California: Instituto Tecnológico de Mexicali.
- Castaño Giraldo, S. A., Hernandez Gomez, D. S., & Gallo Blandón, J. H. (2013). Control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controles pi. *Revista Politécnica*, 69-81.
- G, A. (2007). *Introducción a MATLAB*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. Mexico: PEARSON EDUCACION.
- Gonzales, C. R. (s.f). *EDOC*. Obtenido de <https://qdoc.pub/21-clasificacion-de-los-sensores-y-transductores-pdf-free.html>
- Guzmán Escalante, J. G., & Matailo Vélez, J. C. (2019). *Diseño e implementación de un control neuronal para una*. GUAYAQUIL – ECUADOR : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- Julián Laime, E. R., & Almidos Elescano, Á. (2018). *MANUAL DE PROGRAMACION LabVIEW 9.0 (NIVEL BÁSICO)*. Piura-Perú: Asociación de Apoyo a la Investigación, innovación y transferencia tecnológica.
- Ladino Moreno, E. O., García Ubaque, C. A., & Gàrcia Vaca, M. C. (2021). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista Científica*, 18.
- Martín del Brío, B., & Sanz Molina, A. (2001). *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. Zaragoza: Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones.

- Morales Menéndez, R., & Ramírez Mendoza, R. A. (2013). *Sistemas de control Moderno Volumen I: Sistemas de tiempo continuo*. México: Editorial Digital Tecnológico de Monterrey.
- NI. (s.f). *NI*. Obtenido de What is NI Measurement & Automation Explorer (NI MAX): <https://www.ni.com/es-cr/support/documentation/supplemental/21/what-is-ni-measurement---automation-explorer--ni-max--.html>
- Noriega Rivas, M. E. (2008). *Identificación de sistemas usando una herramienta de software libre con acceso a internet*. Mérida - Venezuela: Universidad de los Andes.
- Ramírez Urrego, J. A. (2015). Un algoritmo genético para sintonización de una estructura de control MPC (DMC) aplicado a una planta de presión. *Revista politécnica*, 77-87.
- Ramos Moreno, P. C. (2015). *Diseño de un sistema de control avanzado para el banco de presión del laboratorio de Automatización Industrial*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Robles Algarín, C., Caputo Llanos, R., & Sánchez Hernández, A. (2012). *Diseño de un sistema Scada basado en labview, implementando* . Medellín: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Rubio Mora, J., & Guerrero Bayona, D. (2016). *Control de Procesos Automatizados*. Barrancabermeja: Escuela de Ingeniería de Producción.
- Sanz, R. (1990). *Arquitectura de Control Inteligente de Procesos*. Departamento de Automatica.
- Sedano, J. F. (1 de Enero de 2009). *TÉCNICA INDUSTRIAL*. Obtenido de <https://www.tecnicaindustrial.es/introduccion-a-la-identificacion-de-sistemas/>
- Tandazo Solano, L. A. (2014). *Diseño y Construcción de un banco para la medición y control de la presión en un proceso experimental*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Tilbury, D., & Messner, B. (s.f de 2021). *CONTROL TUTORIALS FOR MATLAB & SIMULINK*. Obtenido de <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=SimulinkControl>

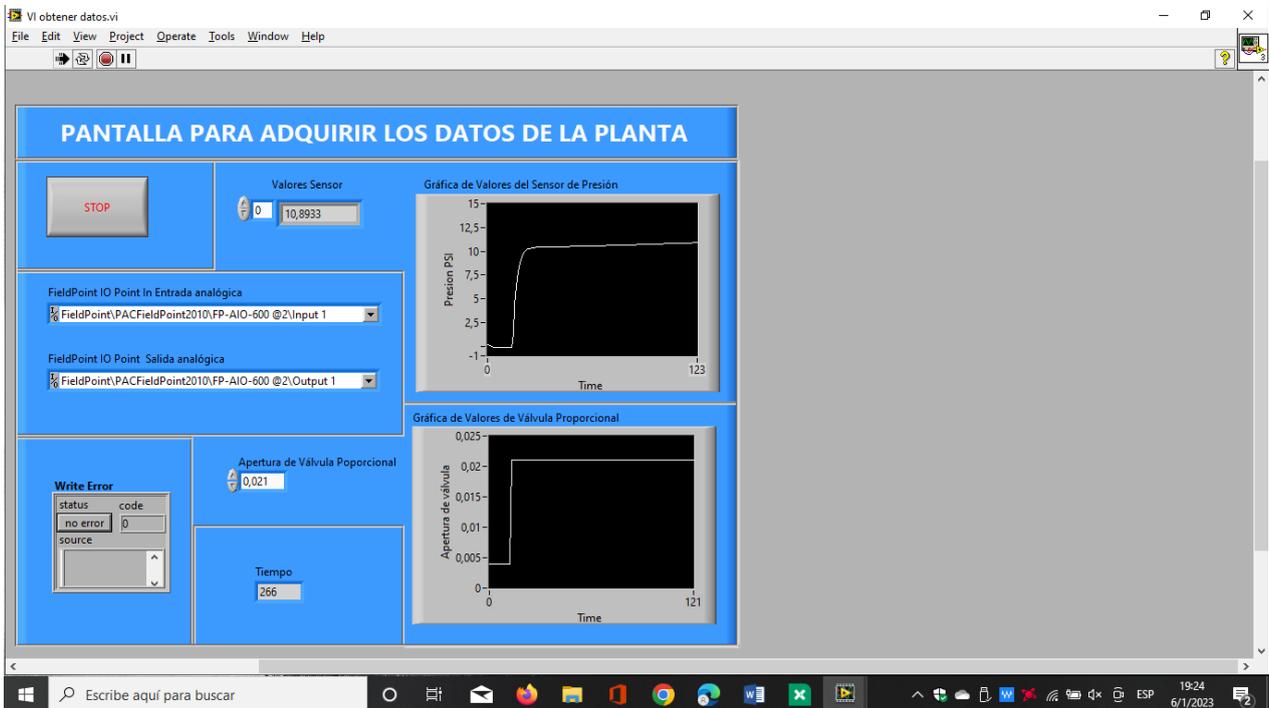
- Turmero, P. (20 de 05 de 2015). *Monografias.com*. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos104/fundamentos-y-clasificacion-sensores/fundamentos-y-clasificacion-sensores>
- Villanueva, E., Rubío Gonzales, M. A., Salvador, R., & Guinea, D. (2014). *Control Borroso en la gestión de presión para PEMFC*. Madrid: ResearchGate.

11. Anexos.

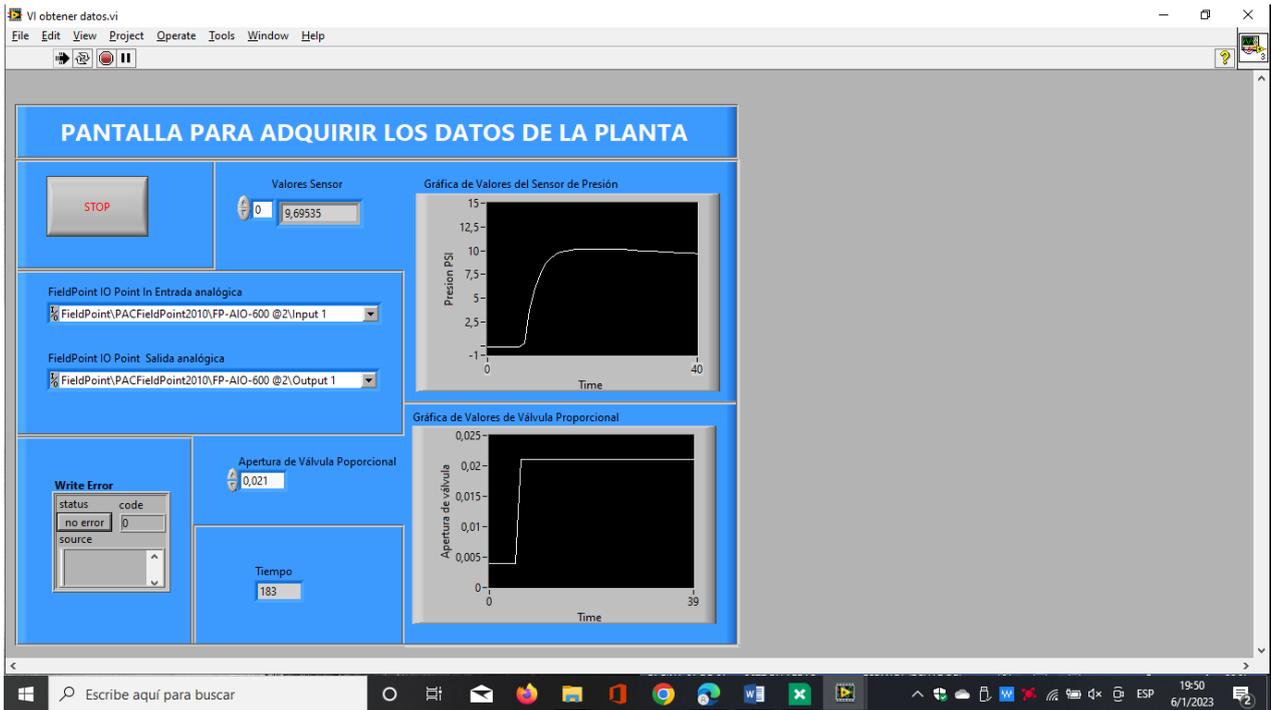
Anexo 1. Ensayo de medición 1



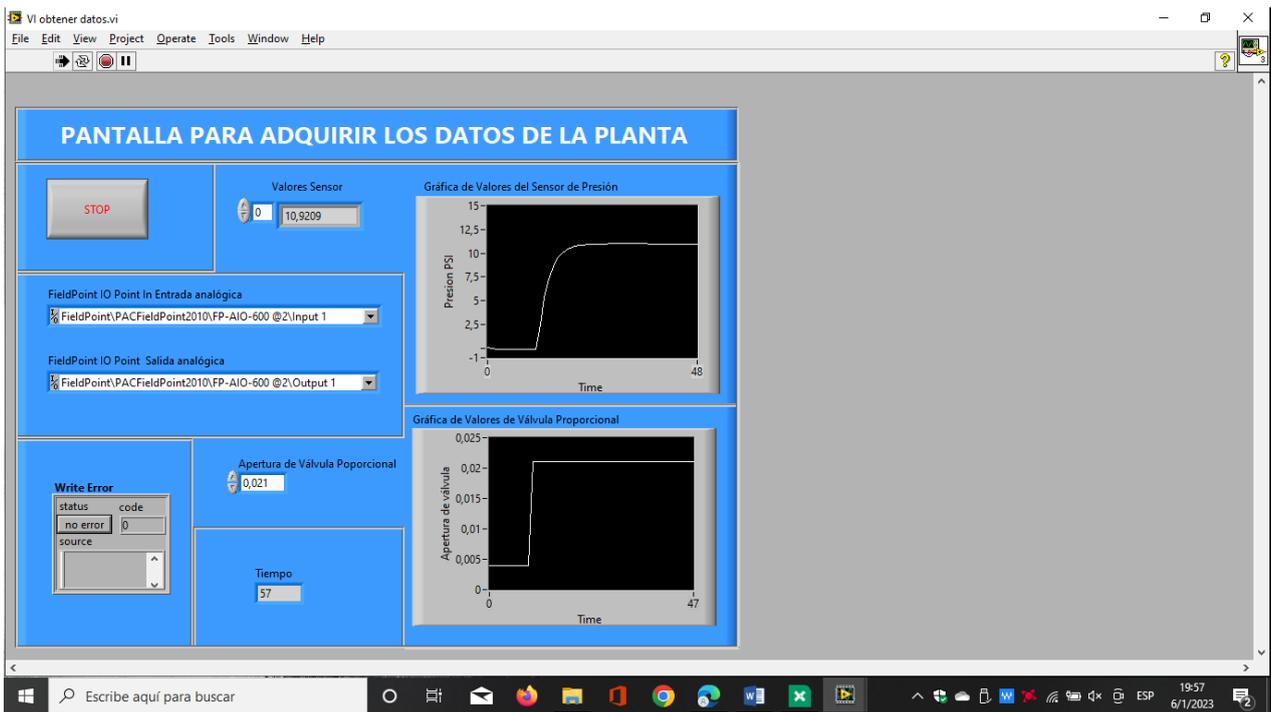
Anexo 2. Ensayo de medición 2



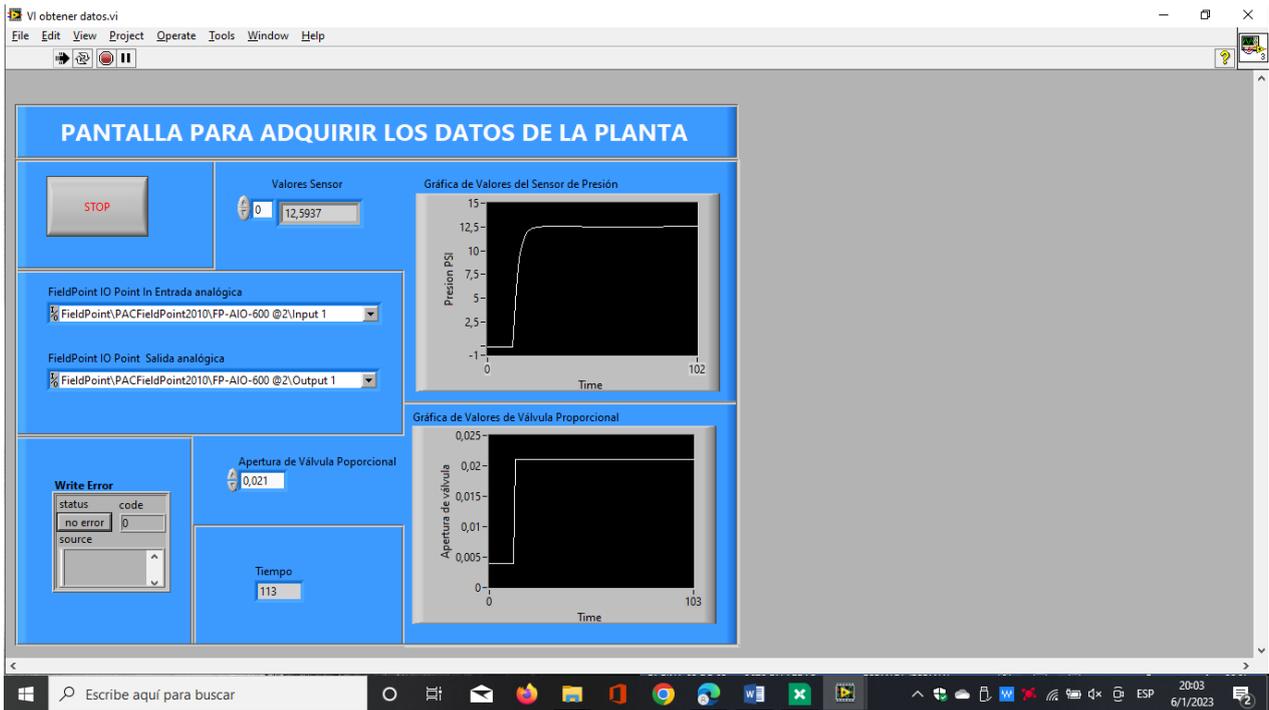
Anexo 3. Ensayo de medición 3



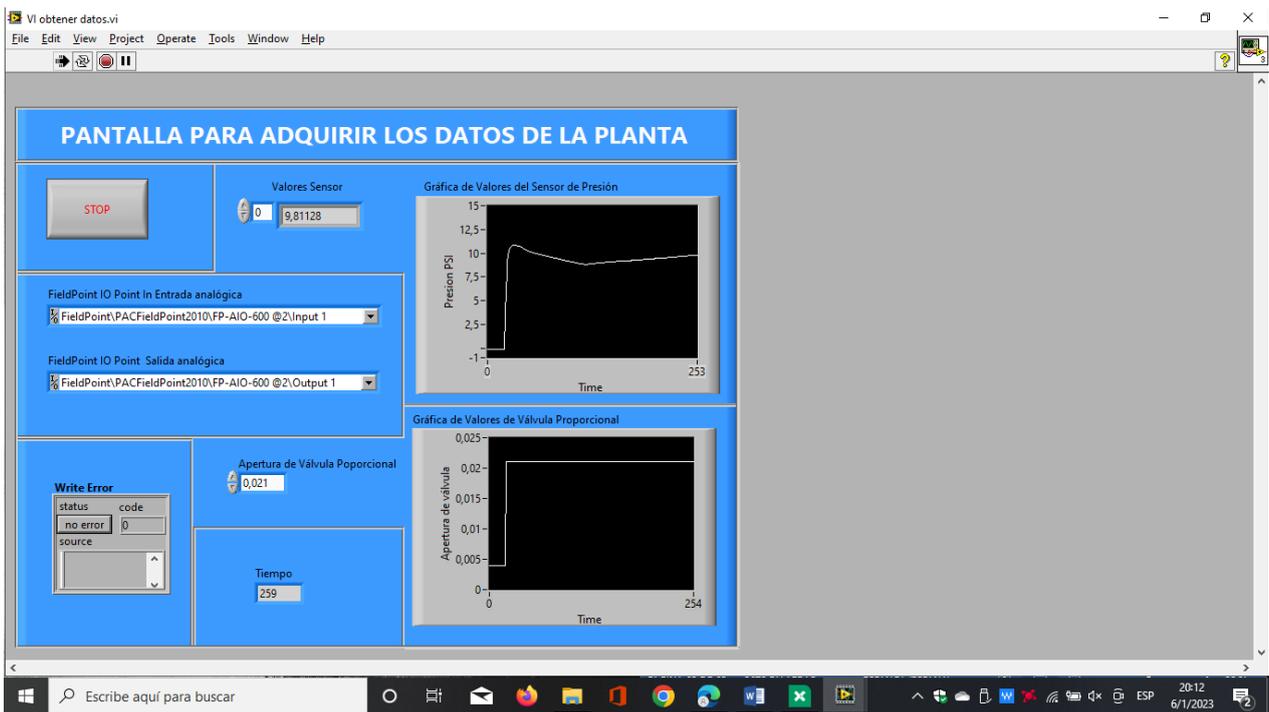
Anexo 4. Ensayo de medición 4



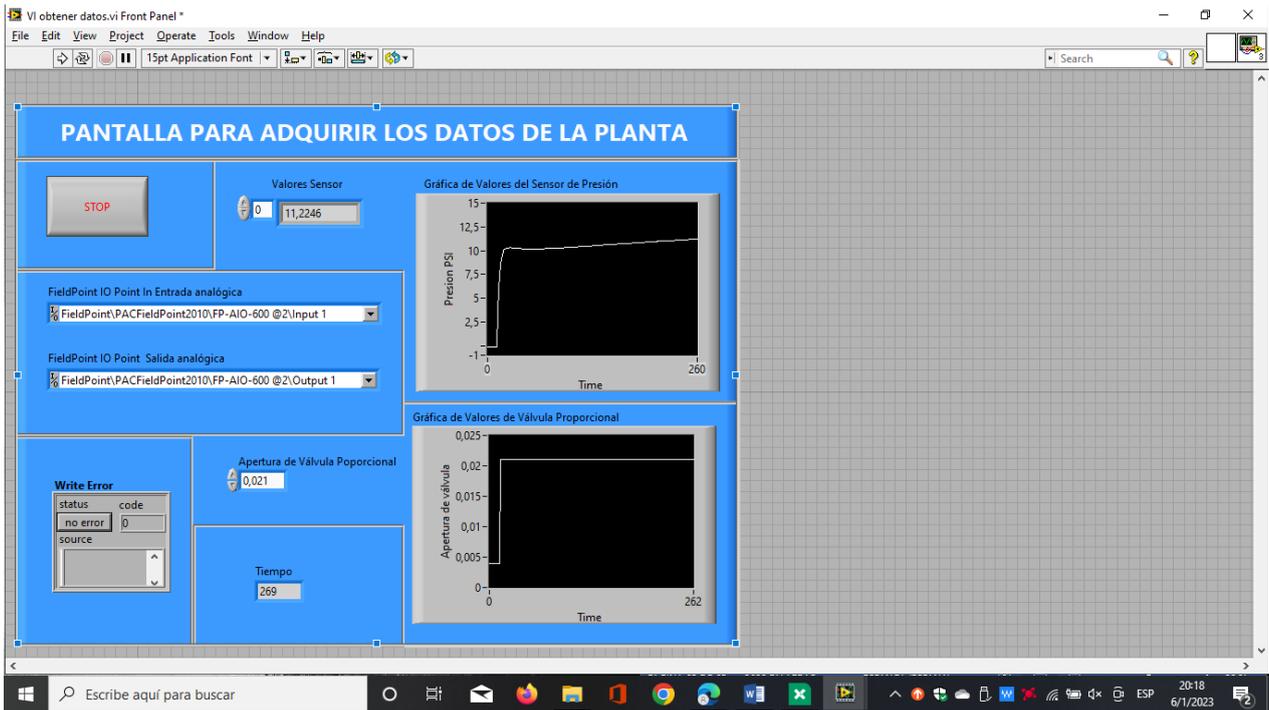
Anexo 5. Ensayo de medición 5



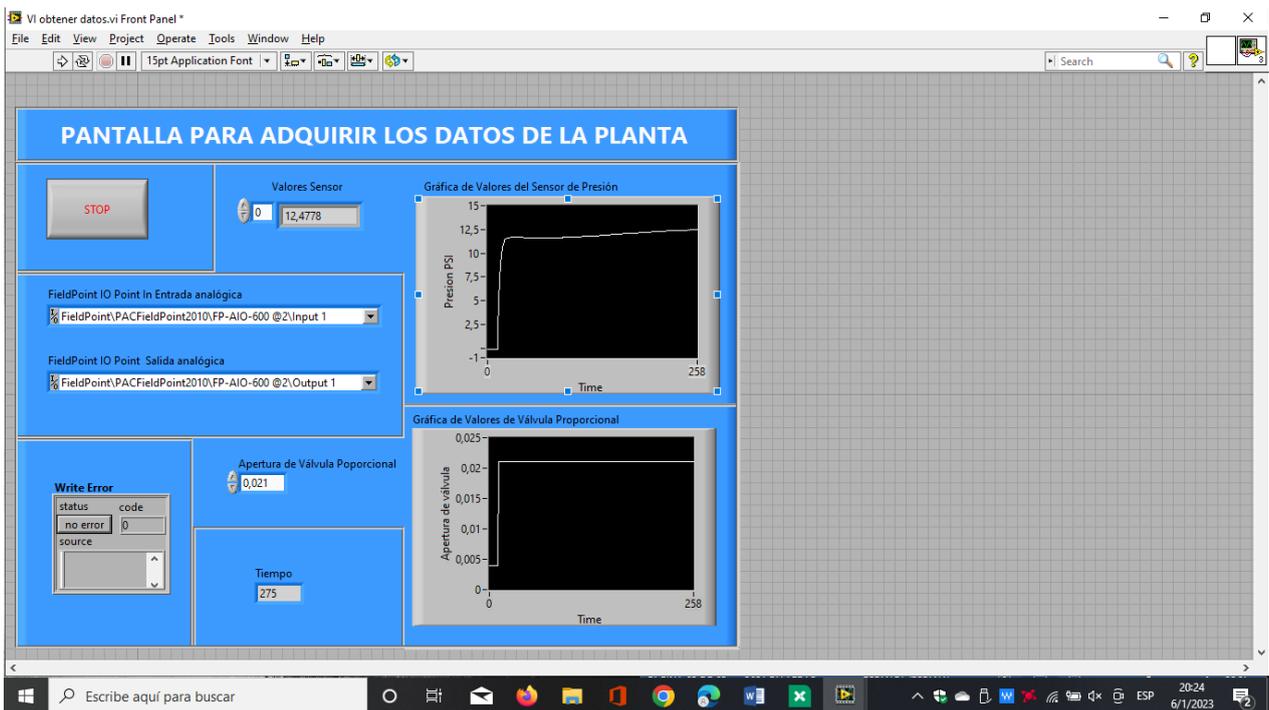
Anexo 6. Ensayo de medición 6



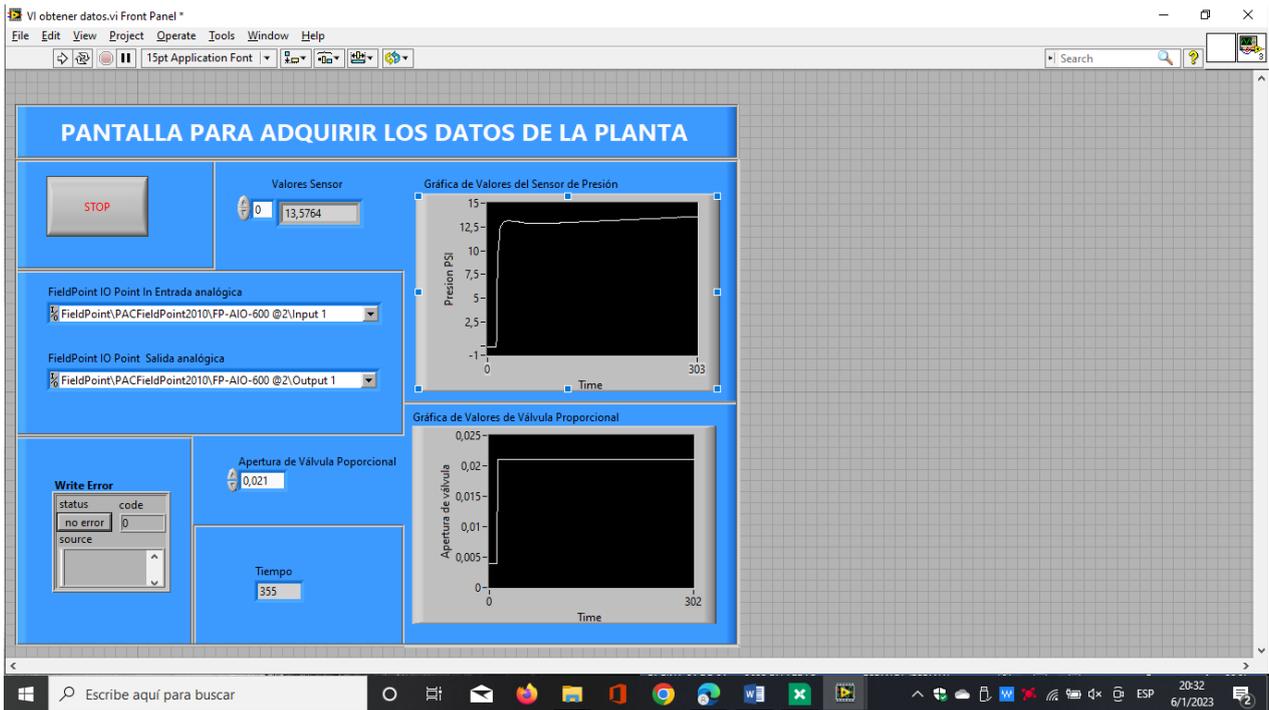
Anexo 7. Ensayo de medición 7



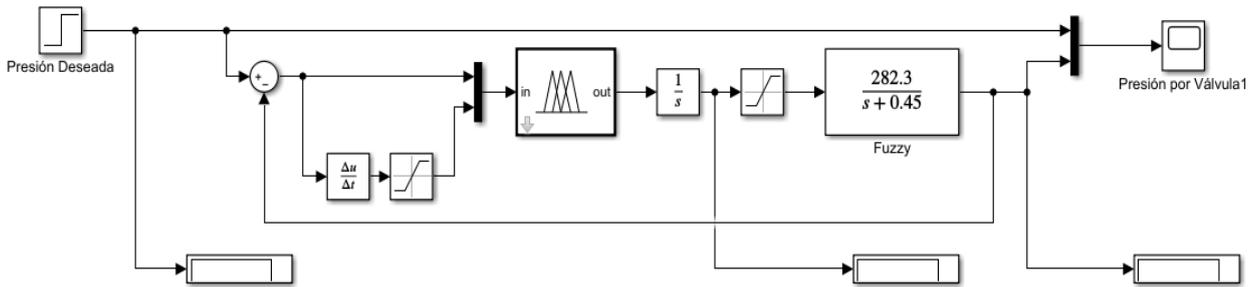
Anexo 8. Ensayo de medición 8



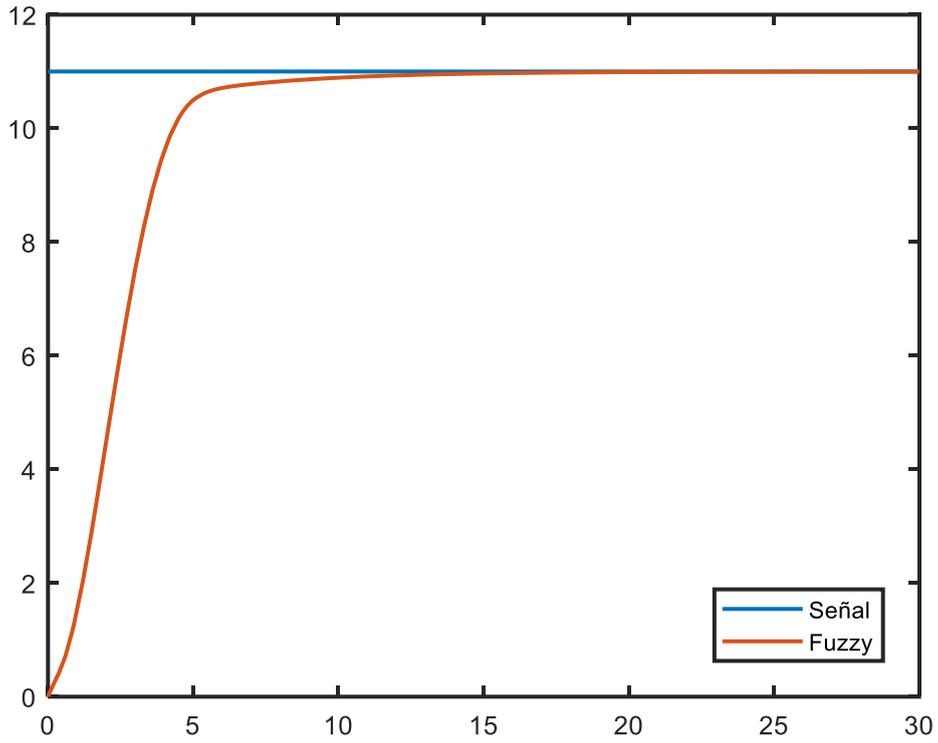
Anexo 9. Ensayo de medición 9



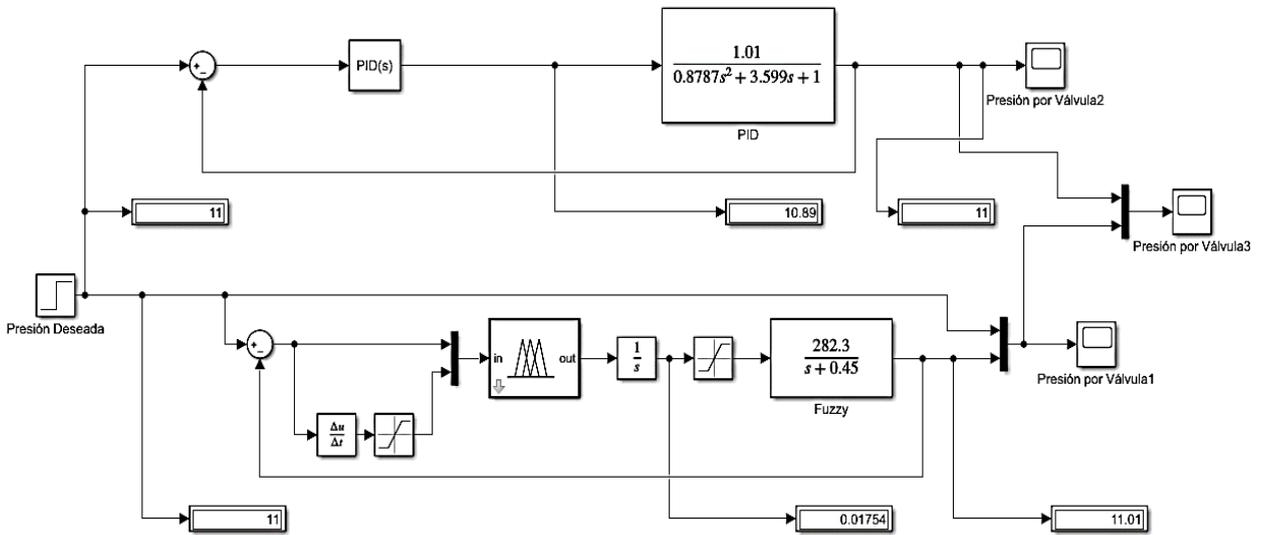
Anexo 10. Diagrama de control Difuso



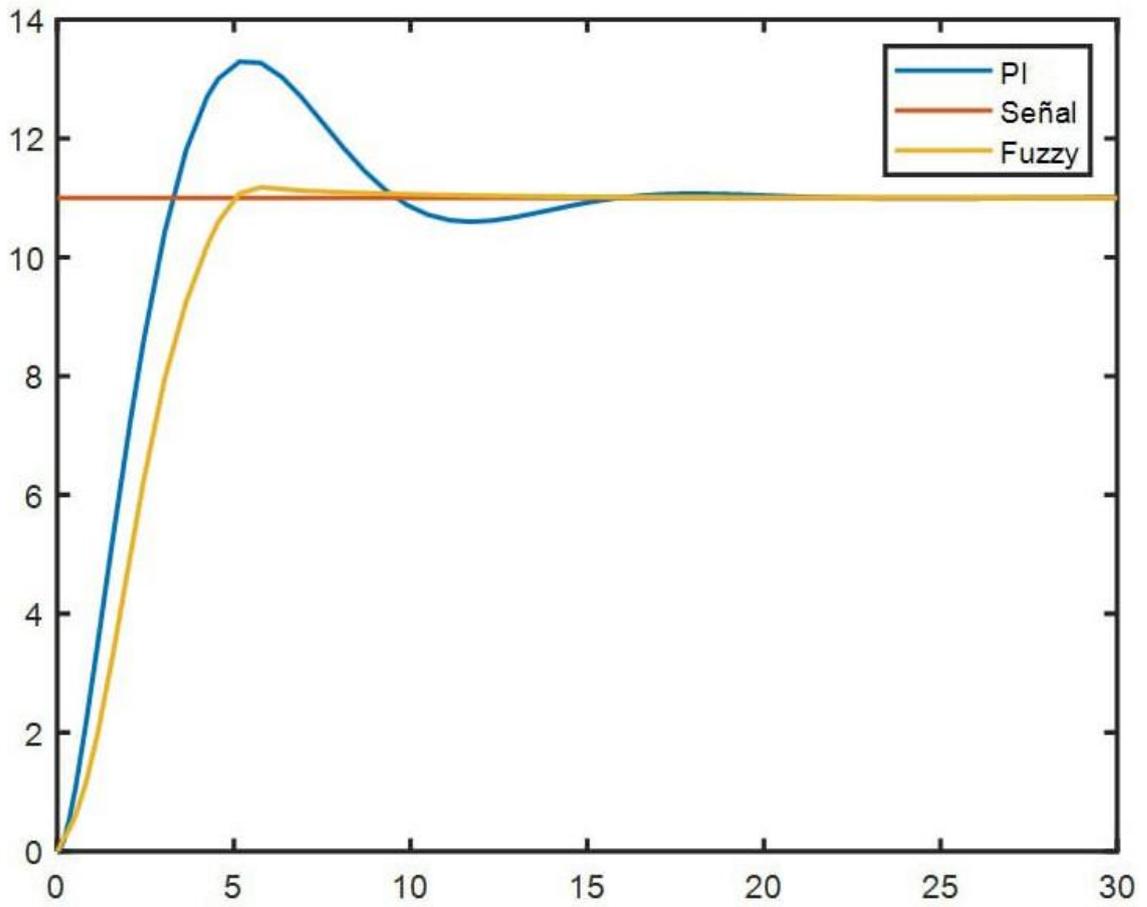
Anexo 11. Grafica de Controlador Difuso



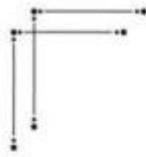
Anexo 12. Diagrama de control Difuso y Pi



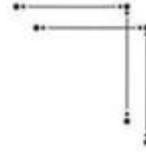
Anexo 13. Grafica de Controlador Difuso y PI



Anexo 14. Certificado de traducción del resumen de trabajo de titulación.



Universidad
Nacional
de Loja



Loja, 14 de febrero de 2024

Lic. Marlon Armijos Ramírez Mgs.

**DOCENTE DE PEDAGOGIA DE LOS IDIOMAS
NACIONALES Y EXTRANJEROS – UNL**

CERTIFICA:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Titulación: Diseño de un sistema de control inteligente para el banco de presión del laboratorio de automatización, autoría de Jhandry Fernando Sotomayor Japón con CI: 1105913485 de la carrera de Carrera de Ingeniera Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja.

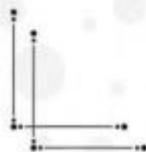
Lo certifica en honor a la verdad y autorizo a la parte interesada hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Atentamente,



MARLON RICHARD
ARMIJOS RAMIREZ

MARLON ARMIJOS RAMÍREZ
DOCENTE DE LA CARRERA PINE-UNL
1031-12-1131340
1031-2017-1905329



Educamos para Transformar

