

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE ING. MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. MECÁNICA ELÉCTRICA



**“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID - DIFUSO EN LA PLATAFORMA
DE LABVIEW PARA EL CONTROL DE NIVELES DE AGUA APLICADOS EN
EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA EPIME”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Luis Alberto Mayta Mamani

Bach. Edwin Ronald Tintaya Gutierrez

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

**“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID - DIFUSO EN LA PLATAFORMA DE
 LABVIEW PARA EL CONTROL DE NIVELES DE AGUA APLICADOS EN EL
 LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA EPIME”**

PRESENTADA POR:

LUIS ALBERTO MAYTA MAMANI
EDWIN RONALD TINTAYA GUTIERREZ

PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA



FECHA DE SUSTENTACIÓN: 17-12-2018

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADA POR:

PRESIDENTE:

M.Sc. ROBERTO JAIME QUIROZ SOSA

PRIMER MIEMBRO:

M.Sc. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

SEGUNDO MIEMBRO:

Ing. FELIPE CONDORI CHAMBILLA

ASESOR/DIRECTOR:

Mc. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

Área: Control de procesos

Tema: Control PID – difuso aplicado para el control de niveles de agua en el módulo del laboratorio de la EPIME.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	3
1. ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
2. ÍNDICE DE TABLAS	14
3. ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	15
4. RESUMEN.....	16
5. ABSTRACT.....	17
1. CAPITULO I.....	18
1.1. Introducción.....	18
1.2. Justificación del proyecto	20
1.3. Objetivos de la investigación.....	20
1.3.1. Objetivo general.....	20
1.3.2. Objetivo específico.....	20
CAPITULO II	
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	21
2.1. Sistemas de Control	21
2.1.1. Tipos de Sistema de Control	23
2.1.2. Controladores Clasicos.....	26
2.2. Métodos de Sintonización.....	31
2.2.1. Método de Ziegler-Nichols	31
2.2.2. Método de Harriot	35
2.2.3. Método de la curva de reacción (cohen- coon 1950).....	35

2.3.	Lógica difusa.....	36
2.3.1.	Conjuntos difusos.....	36
2.4.	Control Difuso	36
2.4.1.	Variables lingüísticas	38
2.4.2.	Funciones de pertenencia	38
2.4.3.	Sistemas difusos	42
2.5.	Controlador PID difuso.....	52
2.5.1.	Sintonización del controlador PID – Difuso	53
2.6.	Medición de nivel de líquidos.....	53
2.6.1.	Medidores de nivel de líquidos	54
2.7.	Sensores	55
2.7.1.	Campo de medida.....	55
2.7.2.	Alcance.....	55
2.7.3.	Error	55
2.7.4.	Incertidumbre de la medida.....	56
2.7.5.	Exactitud	56
2.7.6.	Precisión.....	57
2.7.7.	Zona muerta	57
2.7.8.	Sensibilidad	57
2.7.9.	Repetibilidad	57
2.7.10.	Histéresis	58
2.8.	El Sensor ultrasónico de distancia HC-SR04	58

2.9.	Procesamiento y desarrollo industrial.....	60
2.9.1.	LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.)...	60
2.9.2.	NI myRIO-1900	60
2.10.	Antecedentes del proyecto	61
2.10.1.	Control pid avanzado.....	61
2.10.2.	Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID difuso en lógica reconfigurable	61
2.10.3.	Control difuso para un sistema de nivel implementado en un autómatas programable	61
2.10.4.	Diseño e implementación de un sistema de control por computador en tiempo real de flujo y nivel de agua, utilizando la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), variador de velocidad y programación LabView.	62
2.10.5.	diseño e implementación de un sistema scada para el control de nivel y temperatura del tanque de agua caliente de la planta de procesos análogos (PPA)	62
2.10.6.	Control pid con sintonización difusa y control difuso.....	63
2.10.7.	Desarrollo de una herramienta computacional para la implementación de estrategias de control.....	63
2.10.8.	Diseño y construcción del sistema de control para un intercambiador de calor tubular.	64
2.10.9.	Control difuso vs. control pid: análisis y numeración numérica.	65
2.10.10.	Control difuso para la operación de un sistema de generación de energía eléctrica basado en celdas de combustible tipo pem.....	65

2.10.11.	Modulo didáctico para el control de nivel de líquidos.....	66
2.11.	Hipótesis	67
CAPITULO III		
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	68
3.1.	Características de la planta.	68
3.1.1.	Características del bastidor	69
3.1.2.	Características de los tanques.....	70
3.1.3.	Características del motor.....	72
3.1.4.	Características del gabinete.....	73
3.1.5.	Circuito de mando eléctrico ensamblado en el gabinete.....	75
3.1.6.	Características del variador de velocidad.....	77
3.1.7.	Configuración del variador de velocidad	78
3.2.	Características de los sensores	79
3.2.1.	Características de los caudalímetros	79
3.2.2.	Sensores ultrasónicos	82
3.3.	Tratamiento de la señal	85
3.3.1.	Características de la placa para el tratamiento de señales.....	85
3.3.2.	Esquema de conexión de la placa para el tratamiento de señales	86
3.3.3.	Características del arduino pro mini 328	90
3.3.4.	Código para programar los arduino pro mini para conversión de las señales	92
3.3.5.	Montaje de los componentes en la placa del tratamiento de señales	93

3.3.6.	Carcasa para la placa de tratamiento de señales.....	93
3.3.7.	Adquisición y generación de datos en LabView.....	94
3.4.	Generación de las constantes para el controlador pid.....	95
3.4.1.	Datos obtenidos de la planta	95
3.4.2.	Calculo de los parámetros del controlador PID	97
3.4.3.	Parámetros del control PID con software Matlab	100
3.5.	Implementación del sistema de control PID, PID- difuso	104
3.5.1.	Consideraciones generales	104
3.5.2.	Software LabView	105
3.5.3.	Tarjeta NI myRIO	107
3.5.4.	Creando un proyecto de LabView.....	111
3.5.5.	Desarrollo de software del controlador PID en LabView	120
3.5.6.	Desarrollo de software del controlador PID – Difuso en LabView	123
3.5.7.	Funcionamiento del controlador PID - Difuso.....	142
4.	IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
4.1.	Análisis e interpretación de resultados.	143
4.1.1.	Instrumentación del proceso	143
5.	V. CONCLUSIONES	146
6.	VI. RECOMENDACIONES.....	148
7.	VII. REFERENCIAS	149
8.	ANEXOS.....	152
8.1.	Anexo 01. Programación de los sensores	152

8.2.	Anexo 02. Foto del módulo de nivel.....	159
8.3.	Anexo 03. Programación PID.....	160
8.4.	Anexo 04. Programación PID - difuso.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de Lazo Abierto.....	23
Figura 2.2. Sistema de Lazo Cerrado	24
Figura 2.3. Función de transferencia de un sistema en lazo cerrado.....	25
Figura 2.4. Curva de respuesta ante la función escalón.	27
Figura 2.5. Curva de Respuesta Escalón.....	32
Figura 2.6. Reglas de Ziegler Nichols.....	33
Figura 2.7. Curva de Respuesta exponencial	34
Figura 2.8. Representación esquemática del modelo difuso.	38
Figura 2.9. Función triangular.....	39
Figura 2.10. Función trapezoidal.	40
Figura 2.11. Función Gaussiana.....	41
Figura 2.12. Función Campana.	42
Figura 2.13. Sistema difuso Puro.	43
Figura 2.14. Sistema difuso Tipo Mamdani.....	44
Figura 2.15. Valor de pertenencia del fuzzificador no unitario.	45
Figura 2.16. Regla Si-entonces Mandani	47
Figura 2.17. Ubicación grafica del valor de salida usando COA.....	49
Figura 2.18. Ubicación de SOM, MOM y LOM.....	50
Figura 2.19. Ejemplo grafico de bisección	51
Figura 2.20. Cálculo de los componentes ω_i	52
Figura 2.21. Diagrama de bloques de un control PID - Difuso.....	53
Figura 2.22. Sensor de nivel (Arduino).....	59
Figura 3.1. Diagrama del proceso general de la planta.	68
Figura 3.2. Fotografía del módulo.....	69

Figura 3.3. Características del Bastidor.	70
Figura 3.4. Dimensiones del tanque principal.....	71
Figura 3.5. Dimensiones del tanque principal.....	72
Figura 3.6. Fotografía del motor.	73
Figura 3.7. Dimensiones del gabinete.	74
Figura 3.8. Fotografía de la parte exterior del gabinete.	74
Figura 3.9. Fotografía de la parte interior del gabinete.....	75
Figura 3.10. Circuito del mando eléctrico.....	76
Figura 3.11. Fotografía del variador de velocidad.	77
Figura 3.12. Fotografía del diagrama de conexión del variador.	78
Figura 3.13. Imagen del caudalímetro.....	82
Figura 3.14. Terminales de conexión del sensor ultrasónico.	83
Figura 3.15. Fotografía de la parte posterior del sensor ultrasónico.....	83
Figura 3.16. Soporte del sensor ultrasónico.....	85
Figura 3.17. Placa impresa del tratamiento de señales.....	86
Figura 3.18. Esquema de Conexión de la placa de tratamiento de señales.....	87
Figura 3.19. Esquema de Conexión de placa de tratamiento de señales y sensores. .	88
Figura 3.20. Esquema de Conexión de la placa de tratamiento a la tarjeta NI myRIO.	88
Figura 3.21. Esquema del filtro pasa banda.	89
Figura 3.22. Placa del arduino pro mini.	91
Figura 3.23. . Características del arduino pro mini.....	91
Figura 3.24. Conexiones del arduino pro mini.	92
Figura 3.25. Montaje de los componentes a la placa de tratamiento de señales.	93
Figura 3.26. Carcasa de la placa de tratamiento de señales.	94

Figura 3.27. Diagrama de bloques para la adquisición de datos.....	95
Figura 3.28. Datos reconocidos por Matlab.....	100
Figura 3.29. Selección del menú PID Tuner.....	100
Figura 3.30. Creación de una función de transferencia para la planta.....	101
Figura 3.31. Selección del sub menú step response.....	102
Figura 3.32. Configuración del Step Response.....	103
Figura 3.33. Auto sintonización de la planta.....	103
Figura 3.34. Parámetros obtenidos mediante la auto sintonización.....	104
Figura 3.35. Fotografía de la tarjeta NI-myRIO.....	108
Figura 3.36. NI myRIO USB Monitor.....	109
Figura 3.37. Inicio del programa Labview.....	111
Figura 3.38. Ventana para seleccionar los proyectos.....	112
Figura 3.39. Ventana para seleccionar los dispositivos.....	113
Figura 3.40. Selección del dispositivo a utilizar.....	113
Figura 3.41. Entradas y salidas de la tarjeta NI-myRIO.....	114
Figura 3.42. Ventana para seleccionar el VI dentro de myRIO.....	115
Figura 3.43. Inicialización del nuevo VI dentro de myRIO.....	115
Figura 3.44. Reconfiguración de las ventanas del VI.....	116
Figura 3.45. Selección de las entradas físicas dentro del VI.....	116
Figura 3.46. Señal de entrada de los sensores y su respectiva conversión.....	118
Figura 3.47. Control de inicio y parada del controlador.....	118
Figura 3.48. Animación del Scada.....	119
Figura 3.49. Calculo del error.....	119
Figura 3.50. Grafica del sistema de control.....	119
Figura 3.51. Interconexión del puerto físico con la programación.....	120

Figura 3.52. Conexionado del PID SUB VIAY.VI.....	121
Figura 3.53. Scada del controlador PID.....	122
Figura 3.54. Diagrama de bloques del controlador PID.....	122
Figura 3.55. Diagrama de bloques del controlador PID - difuso.	123
Figura 3.56. Scada del Controlador PID – Difuso	124
Figura 3.57. Fuzzy System Designer	125
Figura 3.58. Herramienta Fuzzy System Designer	125
Figura 3.59. Función de membresía para el E.NA (error negativo alto).....	126
Figura 3.60. Función de membresía para el E.NB (error negativo bajo).	127
Figura 3.61. Función de membresía para el E.Z (error cerro).....	127
Figura 3.62. Función de membresía para el E.PB (error positivo bajo).....	128
Figura 3.63. Función de membresía para el E.PA (error positivo alto).	128
Figura 3.64. Función de membresía KBB (constante proporcional bajo bajo).....	129
Figura 3.65. Función de membresía para el K.B (constante proporcional baja).....	129
Figura 3.66. Función de membresía para el K.M (constante proporcional media)..	130
Figura 3.67. Función de membresía para el K.A (constante proporcional alta).	130
Figura 3.68. Variables para las reglas de la constante proporcional.....	131
Figura 3.69. Reglas para la constante proporcional.	132
Figura 3.70. Campo de acción de las variables de entrada y salida para la Kp	133
Figura 3.71. Variables para las reglas de la constante integral	133
Figura 3.72. Reglas para la constante integral.	135
Figura 3.73. Campo de acción de las variables de entrada y salida para Ki	135
Figura 3.74. Variables para las reglas de la constante derivativa.	136
Figura 3.75. Reglas para la constante derivativa.....	137
Figura 3.76. Campo de acción de las variables de entrada y salida para Kd.	138

Figura 3.77. Diagrama de bloques del controlador difuso para K_p 139

Figura 3.78. Diagrama de bloques del controlador difuso para la constante integral.
..... 140

Figura 3.79. Diagrama de bloques del controlador difuso para la constante derivativa.
..... 141

Figura 3.80. Esquema de funcionamiento del control PID - difuso..... 142

Figura 4.1. Curva de estabilización ideal del controlador PID en el software Matlab.
..... 143

Figura 4.2. Comparación de las señales de respuesta prueba 1. 144

Figura 4.3. Comparación de las señales de respuesta prueba 2. 145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parametros para el controlador metodo Ziegler y Nichols	33
Tabla 2.2. Parámetros de Sintonización método Harriot	35
Tabla 3.1. características del bastidor	69
Tabla 3.2. Elementos del bastidor	69
Tabla 3.3. Características del tanque principal.	70
Tabla 3.4. Dimensiones del tanque principal	70
Tabla 3.5. Características del tanque de suministro.	71
Tabla 3.6. Dimensiones del tanque de suministro.	72
Tabla 3.7. Características del motor.....	72
Tabla 3.8. Características del gabinete.....	73
Tabla 3.9. Características del Sensor de Caudal YF-S201.....	80
Tabla 3.10. Características del Sensor de Caudal FS-300A.....	81
Tabla 3.11. Características del sensor ultrasónico.	84
Tabla 3.12. datos obtenidos de la planta a frecuencia máxima.....	95
Tabla 3.13. Reglas de control para el Kp.	131
Tabla 3.14. Reglas de control para el Ki.....	134
Tabla 3.15. Reglas de control para el Kd.....	136

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

D: Derivativo.

DC: Corriente Directa

EPIME: Escuela Professional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

IDE: Integrated Development Environment.

FTDI: Future Technology Devices International.

GPIB: Global Purpose Interface Bus.

HMI: Human Machine Interface.

I: Integral.

Labview: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.

P: Control Proporcional.

PD: Proporcional Derivativo.

PI: Proporcional Integral.

PCB: Bifenilo Ploriclorado.

PID: Proportional Integral Derivative.

PLC: Controlador Lógico Programable.

PWM: modulación por ancho de pulso.

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, es decir, Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

SNR: Signal Noise Radio.

USB: Universal Serial Bus.

VI: Instrumento Virtual.

FPGA: Field Programmable Gate Array (matriz de compuertas)

RESUMEN

En el mundo actual, donde vivimos la tecnología está en constante avance y el campo de control automático no es la excepción, ya que hoy en día hay la necesidad de contar con sistemas inteligentes para el control de procesos, los cuales tienen que ser rápidos, precisos, eficientes y de un bajo costo. Este proyecto de tesis presenta dos tipos de control, basado en el monitoreo de una variable (altura o nivel de agua), en el laboratorio de control de la escuela Profesional de ing. Mecánica Eléctrica a de la UNA PUNO, la presente investigación se realizó en los meses noviembre de 2017 a noviembre del 2018 procediendo luego al análisis de cada tipo de control para luego deducir y encontrar un sistema de control más eficiente, con mejor respuesta ante perturbaciones y mejor desempeño en el proceso, los objetivos de esta tesis de investigación es de comparar un sistema de control PID simple y un controlador PID difuso, para el proceso de control de nivel de agua deseado en un tanque, realizar la instrumentación del proceso, realizar el control PID y PID difuso, simulación y obtención de resultados. El método utilizado para este trabajo fue experimental.

El análisis realizado en este trabajo está basado referente a los siguientes parámetros:
Tiempo de las señales de salida.

Se realiza con el estudio del tiempo de respuesta, sobreelongación, tiempo de subida y tiempo de retardo, los cuales son medidos en tiempo continuo.

Comportamiento ante perturbaciones.

El análisis se realiza con perturbación al sistema tanto para el controlador PID y PID difuso. Este análisis se realiza comparando la señal sin perturbación y la señal con perturbación y la señal con perturbación con la señal de referencia.

Palabras clave: controlador PID, conjunto difuso, lógica difusa, métodos para controlar un sistema, lazo cerrado.

ABSTRACT

At the present time, we live in a world where technology is in constant advancement and the automatic control field is not the exception, since today there is the need to count on intelligent systems for the process control, which have to be fast, precise and efficient. This project of thesis presents two types of control, once the monitoring of a variable was based on (height or water level), in the laboratory of control of the technical school of ing. Electric mechanics to of the one PUNO, the present investigation came true in the months November 2017 to May of 2018 coming next from each type of control with the purpose of later on deducing to the analysis and finding a most efficient control system, with better answer before disturbances and better performance in the process, the objectives of this fact-finding thesis it is to compare a control system simple PID and a control diffuse PID, for the control process of water level desired in a tank, accomplishing the instrumentation of the process, accomplishing the control PID and diffuse PID, simulation and obtaining of results. The method used for this work was experimental.

The analysis accomplished in this work is based relative to the following parameters:

Time of the output signals

It comes true with the time study of response, over-elongation, time of climb and time of delay, which are measured in continuous period

Behavior before disturbances

The analysis comes true with disturbance to the system as much for the control PID and diffuse PID. This analysis comes true comparing the signal without disturbance and the signal with disturbance and the signal with disturbance with the reference signal.

Key Words: Control PID, fuzzy set, fuzzy logic, methods to control a system, closed tie.

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

En el mundo donde hoy vivimos la automatización y el control de procesos son cada vez más necesarios en la industria, con sistemas de control más precisos errores mínimos y de bajo costo. Por procesos se entiende una secuencia de operaciones para obtener un resultado específico, mientras que el concepto de sistema es más general, siendo comúnmente definido como un conjunto de elementos que interactúan unos con otros para realizar una tarea.

Prexisten muchos sistemas en la naturaleza, algunos naturales y otros implantados por el hombre como los sistemas informáticos, sistemas electrónicos, sistemas mecánicos, sistemas eléctricos, etc. Uno de los retos de la ingeniería es establecer el funcionamiento de un sistema actuante sobre otro sistema, por lo que se puede definir que un sistema de control es el que regula el funcionamiento de otro sistema o proceso.

El control automático tiene una participación cada vez más importante en la vida cotidiana y se ha convertido una parte importante en los procesos modernos, industriales y de manufactura. Además, brinda los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción.

Los sistemas de control automático se pueden clasificar según su estructura en dos categorías: los sistemas de control de lazo abierto y los sistemas de control de lazo cerrado. Los primeros son los más sencillos ya que el controlador no toma en cuenta la respuesta del sistema que está controlando; por el contrario, los controladores de lazo cerrado si toman en cuenta la respuesta del sistema que controlan y son los más utilizados. Existen una gran variedad de controladores de lazo cerrado, pero en particular el

controlador clásico más usado es el controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este se usa para controlar diversos sistemas como hornos, motores DC (corriente directa), entre otros.

En esta investigación se abordará el control de los sistemas utilizando lógica Difusa, cuya planta es representada por dos tanques de agua, un motor, el control del nivel del tanque principal está basado en controlar la frecuencia del motor mediante sensores de nivel y de caudal colocados en puntos específicos de los tanques, con lo que se puede apreciar el sistema de control es de lazo cerrado, los cuales toman el error que existe en la salida obtenida y salida esperada.

CAPITULO I: se describe la introducción y la justificación del problema, objetivo general y objetivos específicos, para el diseño de un controlador PID – difuso en la plataforma de LabView para el control de niveles de agua.

CAPITULO II: se argumenta la teoría de controladores clásicos (PID) y teoría de controladores difusos, como también casos aplicativos al control PID – difuso.

CAPITULO III: se aplica la metodología para el diseño del control PID – difuso y materiales para el proyecto.

CAPITULO IV: se analiza el resultado del controlador PID y PID difuso.

CAPITULO V: se desarrolla las conclusiones del presente proyecto.

CAPITULO VI: se realiza las recomendaciones de acuerdo a los resultados.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La alta petición de sistemas de control en plantas industriales origina la creación de dispositivos cada vez más ininteligibles que generan mejores tiempos y formas de respuesta en el control de procesos y operaciones unitarias, es por ello que esta propuesta se enfoca en la creación de un sistema de control, que posea las características y bondades del controlador PID y el uso de nuevas técnicas de control, como lo son la lógica difusa, así mismo todo ello compuesto dentro de un sistema SCADA que permite la recolección de los datos de la planta o proceso y su manejo para la generación de datos y presentación de la información para los operadores y jefes de planta.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta parte del proyecto de investigación se establecen el objetivo general y los objetivos específicos.

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y realizar un análisis y comparación de un controlador PID y un controlador PID difuso en la plataforma de LabVIEW para el control de niveles de agua aplicados en el laboratorio de control y automatización de la EPIME.

1.3.2. Objetivo específico

- Ejecutar la instrumentación del proceso.
- Modelar el sistema y su control.
- Realizar los controladores PID y PID Difuso.
- Realizar las pruebas del controlador PID y controlador PID - difuso y obtener resultados.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMAS DE CONTROL

El control automático es de gran importancia en el mundo de la ingeniería. El sistema de control, es el conjunto de dispositivos que unen para realizar una tarea, donde el principio básico del control es la regulación automática o guía de dispositivos bajo condiciones de estados estacionarios y transitorios. (Perez Limachi & Canaza Zavala, 2009)

El uso efectivo de estos resultados depende de varios factores como lo son:

- ✓ La realimentación; el cual hace posible el establecimiento y mantenimiento de estabilidad en la operación del sistema
- ✓ La disminución de la sensibilidad de funcionamiento; para limitaciones de diseño, para variaciones de los parámetros de la planta y no linealidades de la planta.
- ✓ La adaptación del comportamiento del sistema a las características desconocidas o variables con el tiempo. (Perez Limachi & Canaza Zavala, 2009)

Sus estudios son muy diversos, pero es esencial en el control numérico de las máquinas herramientas, industrias de manufactura, industria aeroespacial, diseño en la industria automotriz además en los procesos industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, nivel de agua y flujo en la industria de proceso. (Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p. 7)

A continuación, se puntualiza la terminología necesaria en la teoría de control automático basado en (Ogata, 1998, p. 2-3)

Variable controlada y variable manipulada: La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La, variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema.

Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado. En el estudio de la ingeniería de control, necesitamos definir términos adicionales que resultan necesarios para describir los sistemas de control.

Plantas. Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular. llamaremos planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (tal como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial).

Procesos. un proceso es una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados.

Sistemas. Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Perturbaciones. Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se

denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

2.1.1. Tipos de Sistema de Control

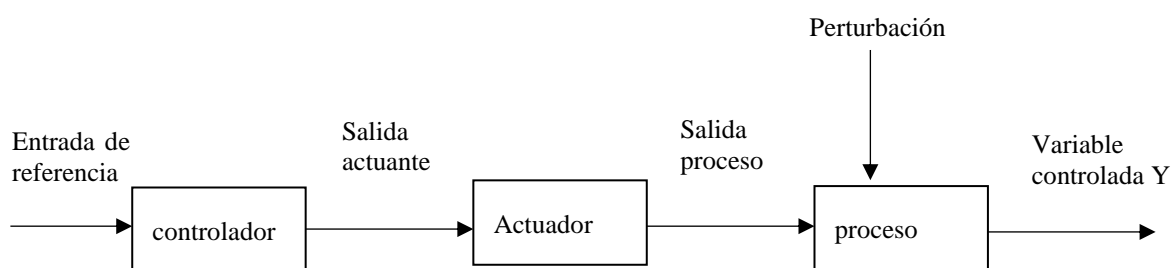
Los sistemas de control de acuerdo a su principio de funcionamiento, pueden emplear o no información que existe en el sistema, y las maniobras de supervisión. Se cuenta con dos tipos de sistema de control. (Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p. 8)

- Sistemas en lazo abierto
- Sistemas en lazo cerrado o realimentado.

2.1.1.1. *Sistemas en Lazo Abierto*

Con un sistema de lazo abierto la entrada se elige en base en la experiencia que se tiene con dichos sistemas para producir el valor de salida, sin embargo, no se ve modificada por el cambio en las condiciones externas. Un esquema de este tipo se presenta en la figura 2.1. (W. Bolton 2a edicion, p. 4)

Figura 2.1. Sistema de Lazo Abierto

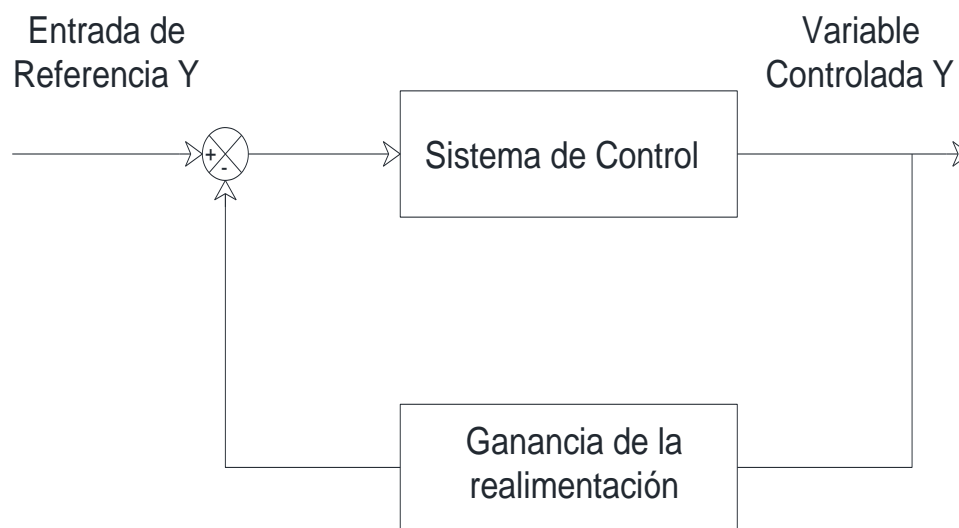


Elaboracion: Propia

2.1.1.2. Sistema en Lazo Cerrado o Realimentados.

Con un sistema de control de lazo cerrado tiene una señal de realimentación hacia la entrada desde la salida, la cual se utiliza para modificar la entrada de modo que la salida se conserve a pesar de los cambios en las condiciones de operación. Figura 2.2. (W. Bolton 2ª edición, p. 4).

Figura 2.2. Sistema de Lazo Cerrado



Fuente: (Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p.9)

Comparación entre sistemas en lazo abierto y lazo cerrado:

Lazo abierto

- Muy sencillos
- Bajo costo
- Buena confiabilidad
- Con frecuencia son erróneos, por que no hay corrección de errores.

Lazo cerrado

- Capaces de igualar los valores reales a los solicitados
- Son mas costosos

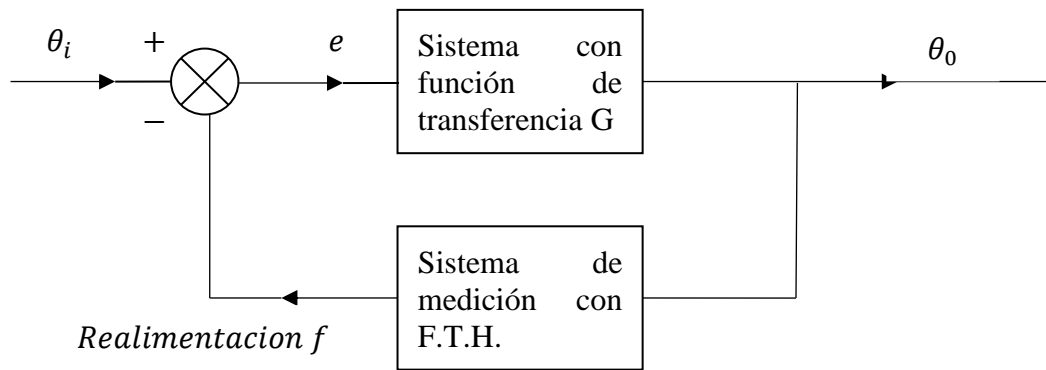
- Mayor cantidad de componentes. (W. Bolton 2ª edición, p. 5)

Funcion de transferencia de los sistemas de lazo cerrado.

La funcion de transferencia se define como el cociente de la salida en estado estable entre la entrada en estado estable para un sistema o subsistema ecuación (2.1).

$$\text{funcion de transferencia } G = \frac{\text{salida en estado estable}}{\text{entrada en estado estable}} \quad (2.1)$$

Figura 2.3. Función de transferencia de un sistema en lazo cerrado



Elaboración: Propia

El sistema que se controla tiene una función de transferencia G, entonces con su entrada de la señal de error e y salida θ_0 , ecuación 2.2.

$$G = \frac{\theta_0}{e} \quad (2.2)$$

Si la trayectoria de realimentación tiene una función de transferencia H, con entrada θ_0 y la salida f, ecuación 2.3.

$$H = \frac{f}{\theta_0} \quad (2.3)$$

La señal de error e es la diferencia entre θ_i y f, la señal de realimentación f es una medida de la medida de la salida del sistema completo, ecuación 2.4.

$$e = \theta_i - f \quad (2.4)$$

Al remplazar e y f, despegándolos a partir de las dos ecuaciones anteriores,

$$\frac{\theta_0}{G} = \theta_i - H\theta_0$$

$$\theta_0 \left(\frac{1}{G} + H \right) = \theta_i$$

$$\theta_0 \left(\frac{1 + GH}{G} \right) = \theta_i$$

Por lo tanto, la función de transferencia completa del sistema de control en lazo cerrado es la ecuación 2.5.

$$\text{funcion de transferencia} = \frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{G}{1+GH} \quad (2.5)$$

La ecuación anterior se aplica a realimentación negativa. Con realimentación positiva el denominador de la ecuación anterior se convierte en $(1 - GH)$. (W. Bolton 2ª edición, p. 22)

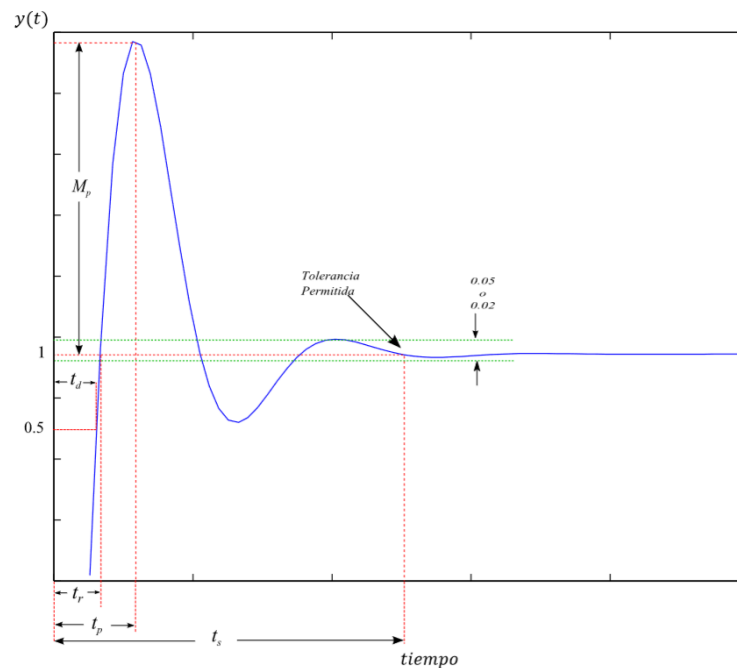
2.1.2. Controladores Clasicos

Los controladores contrastan el valor de una variable medida (señal de entrada) y el valor deseado (set point) para originar una señal de salida que mantenga el valor deseado de la variable y usa la diferencia entre el valor deseado y el valor de salida para manipular la variable controlada. (Pantoja Laces, 2013, p. 18-19)

Uno de los metodos para identificar el desempeño de los controladores es el uso de una señal de entrada representada por el escalon unitario, ya que si se conoce esta respuesta, es viable calcular las respuesta a cualquier otra entrada mediante tecnicas matematicas. Las especificaciones mas comunes son las siguientes, ver Figura 4. (Pantoja Laces, 2013, p. 18-19)

- Tiempo de retardo t_d
- Tiempo de subida t_r
- Tiempo pico t_p
- Sobreelongacion o sobre impulso MP
- Tiempo de asentamiento t_s .

Figura 2.4. Curva de respuesta ante la función escalón.



Fuente: Gonzales Leon, 2013.

Los parámetros en la imagen anterior se utilizan para medir y comparar los tiempos en la señal de salida de los diferentes controladores que se verán en esta tesis de investigación. (Pantoja Laces, 2013)

2.1.2.1. Control Proporcional (P)

Este controlador toma su nombre debido que su salida es proporcional al valor del error rasgo principal es la presencia de offset que indica que el error no se ha eliminado completamente. (Pantoja Laces, 2013)

Este tipo de controlador tiene una correspondencia de su salida $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ como se ve en la ecuación 2.6.

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.6)$$

Se puede ver también en el dominio de la transformada de Laplace representado por la ecuación 2.7. En donde k_p es la ganancia proporcional. (Pantoja Laces, 2013, p.19)

$$U(S) = k_p E(S) \quad (2.7)$$

2.1.2.2. Controlador Proporcional – Derivativo (PD)

Este controlador añade una acción derivativa, por lo que la señal de salida es directamente proporcional a la velocidad con que varía la variable controlada. Este controlador crea una señal de salida mediante la unión de la acción proporcional anteriormente mencionada y la acción derivativa, la ecuación 2.8 representa es controlador. (Pantoja Laces, 2013, p.19)

$$u(t) = k_p \left\{ e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (2.8)$$

También se aprecia, representado con la transformada de Laplace, ver ecuación 2.9:

$$U(S) = k_p \{1 + \tau_d S\} E(S) \quad (2.9)$$

El valor de τ_d es el tiempo derivativo y corresponde al cambio en el tiempo del error. El controlador PD da al sistema una mayor estabilidad que los controladores inicialmente mencionados, ya que este controlador tiene una respuesta transitoria con menor sobreelongación. El control PD es un control de alta sensibilidad, por cual su desventaja es que amplifica señales de ruido, no obstante, tiene la ventaja de usar una acción de control derivativa la cual responde a la velocidad del cambio del error se vuelva

demasiado grande. Por ende, el control derivativo predice el error iniciando una acción oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. (Pantoja Laces, 2013, p.19)

2.1.2.3. Controlador Proporcional- Integral

Muchos de los procesos requieren que se controlen en la señal de referencia y no se admite desviación en ellos, por este motivo se introduce la acción integral o de reajuste por lo que se puede tener un controlador proporcional-integral (PI). La acción integral tiene el objetivo de vencer al offset producido por corregir el tamaño del error sin considerar el tiempo.

La ecuación 2.10 describe al controlador PI y su transformada de Laplace es representada por la ecuación 2.11:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.10)$$

$$U(S) = k_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_I S} \right\} E(S) \quad (2.11)$$

Siendo k_p la ganancia proporcional y τ_I el denominado tiempo integral. Tanto k_p como τ_I son graduables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de k_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El opuesto del tiempo integral se denomina velocidad de reajuste, que es la cantidad de veces por minuto que se aumenta la parte proporcional de la acción de control. (Pantoja Laces, 2013, p.21)

2.1.2.4. Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Este controlador es con frecuencia es el más utilizado y uno de los que brindan mayor precisión dentro de la regulación automática. El controlador recibe su nombre ya que es la composición de una acción de control proporcional, una acción de control integral y

una acción de control derivativa por lo que se nombra acción de control proporcional–integral – derivativa o PID. El algoritmo del cálculo del control PID requiere de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error actual. El integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto asegura que, empleando un esfuerzo de control necesario, el error que se registra se reduce a cero. El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. El PID tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación 2.12 representa el controlador con esta acción combinada. (Pantoja Laces, 2013)

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + k_p \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Representado con la transformada de Laplace, ver ecuación 2.13

$$U(s) = k_p \left\{ 1 + \frac{s}{\tau_I s} + \tau_d s \right\} E(s) \quad (2.13)$$

Es necesario decir que los valores de k_p , τ_d , τ_I representan los mismos valores que anteriormente se mencionaron. Los controladores PID se confían para procesos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido del exterior. Además, ellos son de gran utilidad cuando se regulan procesos industriales como en el control de presión, flujo, temperatura, posición, velocidad y nivel; este último tipo de planta es el estudiado en este documento ya que se desea controlar la velocidad angular de un motor de corriente alterna. (Pantoja Laces, 2013, p.22-23)

Existen una gran cantidad de controladores, sin embargo, estos controladores clásicos tienen limitaciones que llegan a entorpecer el control de procesos cuando se presentan

perturbaciones o ruido, por tal motivo se requieren controladores inteligentes. De manera que se han explorado las técnicas de la inteligencia artificial. para efectuar en control. (Pantoja Laces, 2013)

Este proyecto se realiza el controlador Pid – difuso, que combina la lógica difusa y el control convencional. (Pantoja Laces, 2013, p.22-23)

2.2. MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN

Existen varios métodos de ajustes de las ganancias de un controlador PID, entre los más conocidos tenemos el método de oscilación o método de curva reacción (Ziegler y Nichols) y el método basado en la curva reacción o método de respuesta al escalón (Cohén Coon). El primero se basa en un lazo de control solo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema comience a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, se puede establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID. (Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p. 51-52)

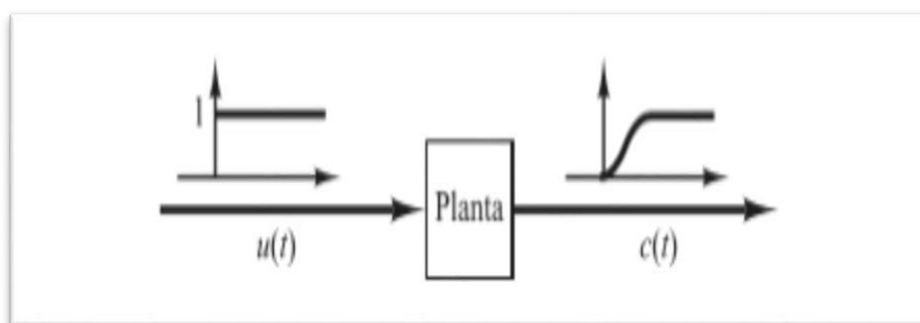
2.2.1. Método de Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols propusieron reglas para hallar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta establecida. La determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols aparecieron numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos

controladores.) Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación, se hace una breve presentación de estos dos métodos. (Ogata, 2013)

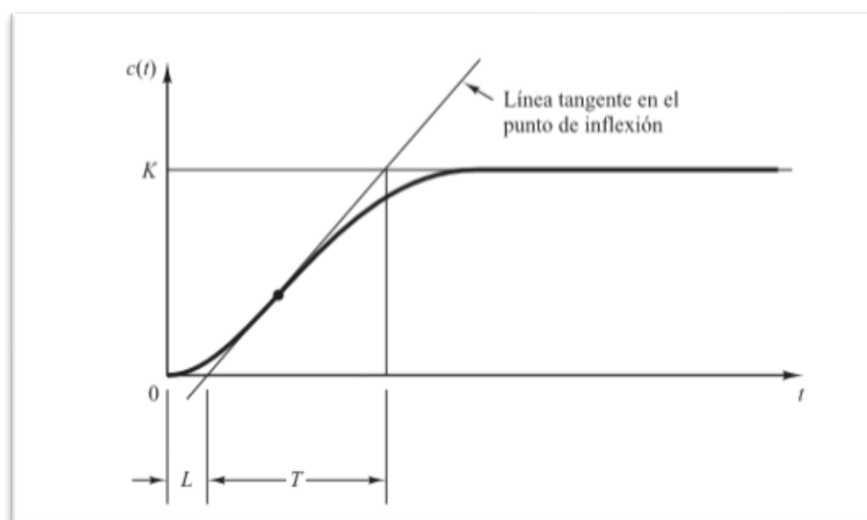
Primer método. la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, así como se muestra en la Figura 2.5. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la Figura 2.6. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Así las curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$, tal como se muestra. (Ogata, 2013)

Figura 2.5. Curva de Respuesta Escalón



Fuente: (Ogata, 2003)

Figura 2.6. Reglas de Ziegler Nichols



Fuente: (Ogata, 2013)

Tabla 2.1. Parametros para el controlador metodo Ziegler y Nichols

Tipo de controlador	K_P	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$		
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	
PID	$\frac{T}{1.2}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: (ogata, 2003)

En la figura 2.6, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo como se muestra en la ecuación 2.14:

$$G(x) = \frac{K}{TS+1} e^{-LS} \tag{2.14}$$

Donde:

K: ganancia

T: constante del tiempo, que demuestra la rapidez del sistema

L: tiempo de retardo

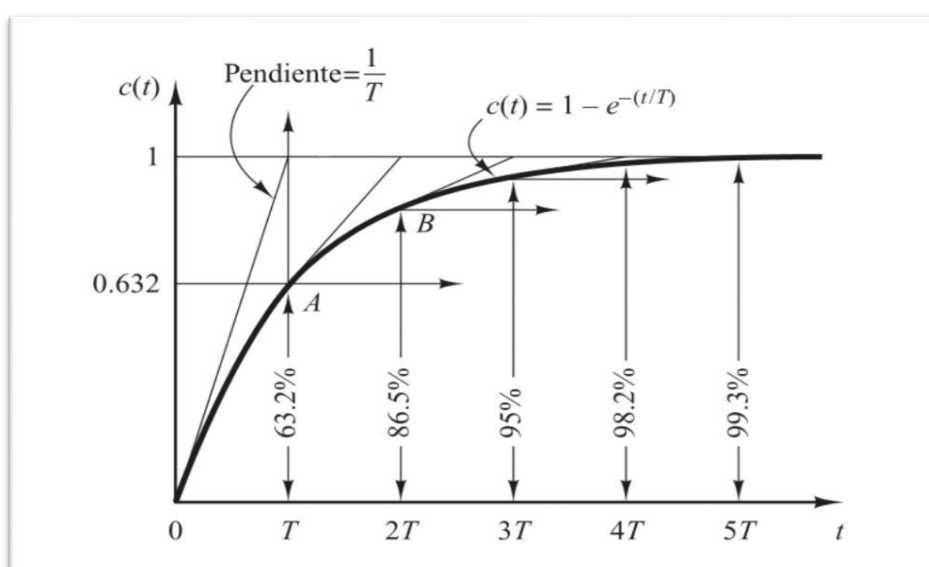
El método de Ziegler-Nichols es aplicable sí $0.1 < LT < 1$. Para valores mayores de LT , se recomienda usar controladores con compensación de tiempo muerto y para valores menores se recomienda usar controladores de orden mayor. (García Jaimes, 2009, p. 198)

Por tanto, decimos que la ganancia indica cuánto cambia la variable de salida por unidad de cambio en la función de variable de entrada: es decir, la ganancia define la sensibilidad del proceso. (A. Smith & B. Corripio, 1991, p. 98). La ganancia se define matemáticamente en la ecuación 2.15:

$$K = \frac{\Delta O}{\Delta I} = \frac{\text{A variable de salida}}{\text{A variable de entrada}} \quad (2.15)$$

Y también se conoce:

Figura 2.7. Curva de Respuesta exponencial



Fuente: (Ogata, 2003)

Donde se deduce que la constante de tiempo al 98.2% en la ecuación 2.16:

$$4T = \Delta t \quad (2.16)$$

Entonces se tiene la ecuación 2.17:

$$T = \frac{\Delta t}{4} \quad (2.17)$$

2.2.2. Método de Harriot

Este método reside en realimentar el sistema (proceso) a controlar con un controlador proporcional. (Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p. 51-53)

La relación entre el primer y segundo sobrepasos debe ser igual a 0.25, esto es:

$$b/a = 0.25$$

Las fórmulas de sintonización son en este caso:

Tabla 2.2. Parámetros de Sintonización método Harriot

Tipo de controlador	K_P	τ_i	τ_d
P	K_0		
PI	K_0	T_0	
PID	K_0	$\frac{T_0}{1.5}$	$\frac{T_0}{6}$

Fuente: (Ogata, 2003)

2.2.3. Método de la curva de reacción (cohen- coon 1950)

En este método el proceso a controlar se caracteriza por utilizar una función de transferencia de primer orden con tiempo muerto, de la siguiente forma: ecuación 2.18.

(Canaza Zavala & Perez Limachi, 2009, p. 55)

$$G_p(s) = \frac{ke^{-tds}}{\tau s + 1} \quad (2.18)$$

2.3. LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa nace en 1965 a partir de la publicación del artículo Fuzzy sets escrito por Lotfi Zadeh. La lógica difusa contrasta con la lógica convencional pues define conceptos en grados variables de pertenencia tratando de emular patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano, contrario a la lógica convencional que utiliza conceptos absolutos para referirse a la realidad. (Pantoja Laces, 2013, p.22-23)

2.3.1. Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos son aquellos elementos que necesariamente no tienen por qué pertenecer (grado de pertenencia 1) o no pertenecer (grado de pertenencia 0), sino que pertenecen según un cierto grado entre 0 y 1, donde el grado está dado por la función de pertenencia del conjunto. (Zatarain Vera, 2011)

2.4. CONTROL DIFUSO

El desarrollo del control difuso tiene, su comienzo en los sistemas establecidos en reglas para la toma de decisiones y en la lógica difusa para la evaluación de aquellas.

Los controladores difusos, al igual que otros, toman los valores de entrada, cumplen algún procedimiento con ellas, deciden como variar las variables de salida y lo realizan, afectando así estas últimas a la planta. La diferencia notable es que no procesan ecuaciones ni tablas, procesan reglas para decidir cómo cambiar las salidas. Esto lo hace una tecnología muy viable, ya que las reglas están más cerca del sentido común que de las ecuaciones y los modelos. (Saldaña Zamora & Santos Espinoza, 2013)

Los problemas abordados con esta técnica son entre otros los de diagnóstico médico, planeadores de trayectoria, controladores de tráfico, acceso inteligente a base de datos. Este conocimiento consta de hechos y heurística, siendo los primeros la información pública y generalmente disponible, para la resolución de un problema en particular, mientras que la heurística es más privativa del experto, es justamente ese conocimiento en particular que lo hace destacarse en su tarea. (Saldaña Zamora & Santos Espinoza, 2013) Cuando este conocimiento esta expresado como reglas del tipo:

SI antecedentes ENTONCES consecuentes.

SI condición ENTONCES acción.

Entonces se dice que es un sistema basado en reglas.

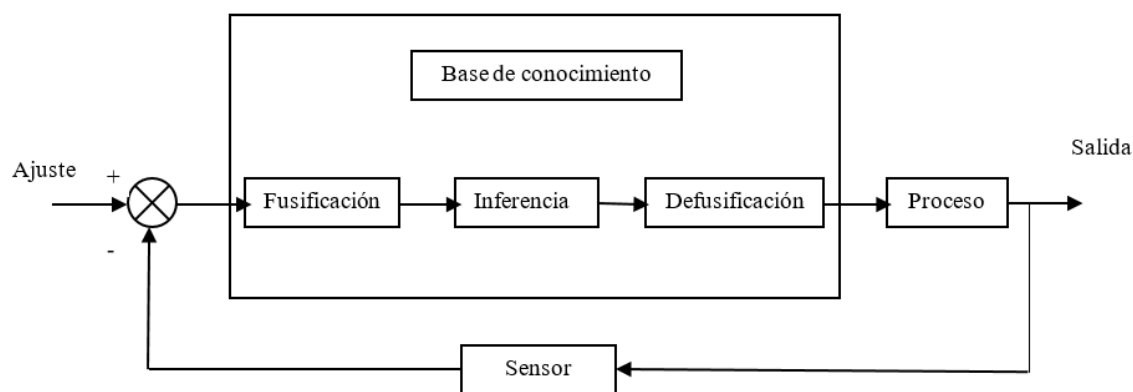
En cuanto al mecanismo de inferencia, es la parte de control de programa, encargada de procesar las reglas contenidas en la base de conocimiento, tomando en cuenta los datos nuevos y el estado del sistema, y producir como resultado de cambio nuevo en el estado del mismo para así comenzar ciclo nuevo.

En general la evaluación de las reglas se realiza utilizando lógica aristotélica, la cual es muy rígida y, por lo tanto, a veces es difícil representar el conocimiento del experto mediante este paradigma.

Para ello basta con tratar de describir con un conjunto de reglas, el conocimiento necesario para realizar un tarea sencilla y cotidiana como, por ejemplo, estacionar un vehículo. Es en este punto donde comienza a cobrar importancia la lógica difusa, ya que enseguida se tratarán de esbozar reglas con calificativos no demasiado precisos, tales como, si el móvil está muy cerca del cajón ... entonces ..., o si el ángulo es pequeño...entonces..., o si el ángulo es pequeño... entonces..., o si..., entonces girar a la izquierda, etc. Este proceso cíclico puede ser dividido en tres grandes partes,

fusificación, evaluación de reglas y defusificación como se aprecia en la figura 2.8 (Saldaña Zamora & Santos Espinoza, 2013, p. 36)

Figura 2.8. Representación esquemática del modelo difuso.



Elaboración: propia

2.4.1. Variables lingüísticas

Una variable lingüística adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas palabras se pueden representar mediante conjunto difusos. Una variable numérica toma valores numéricos, por ejemplo: edad = 65, mientras que una variable lingüística toma valores lingüísticos: edad es “viejo”. Todos los valores lingüísticos forman un conjunto de términos o etiquetas. (Ponce Cruz, 2010, p. 34)

2.4.2. Funciones de pertenencia

Para la representación de los grados de pertenencia de cada uno de los elementos que conforman el conjunto difuso, lo más natural es extraer los datos de los fenómenos que se va a representar y con ellos definir la forma de la función de membresía. De otra manera existen metodologías que permiten asignar grados de membresía a cada uno de los elementos del conjunto. Existen funciones de membresía convencionales y no convencionales que permiten realizar un mapeo de un universo nítido a un universo difuso

(grados de membresía entre 0 y 1). Entre las funciones de membresía convencionales se tienen las siguientes. (Ponce Cruz, 2010, p. 49-50)

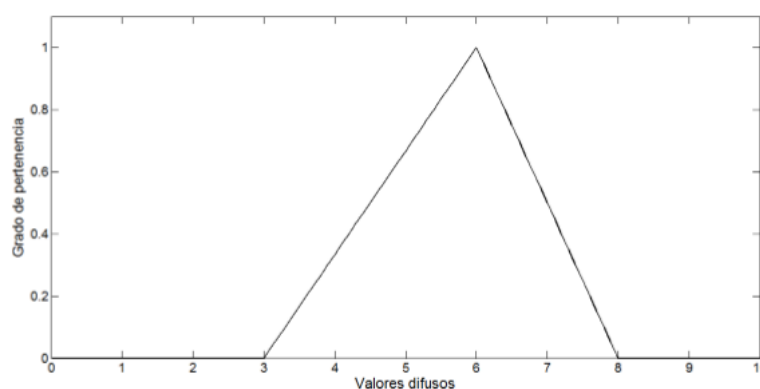
2.4.2.1. Función Triangular

La función triangular se define como muestra la ecuación 2.19:

$$\mu_{triangular}(x; a, b, c) \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & , b \leq x \leq c \\ 0 & , c \leq x \end{cases} \quad (2.19)$$

Donde a, b y c representan la coordenada del eje horizontal de los vértices del triángulo formado. Un ejemplo de una función triangular usando el software MatLab es función `trimf(x, {3 6 8})` mostrada en la Figura 2.9. (Pantoja Laces, 2013, p.25)

Figura 2.9. Función triangular.



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

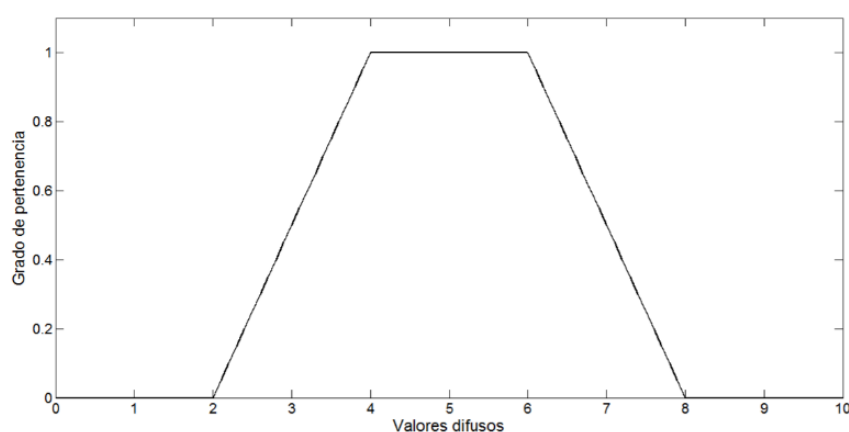
2.4.2.2. Función Trapezoidal

La función trapezoidal se define con la ecuación 2.20:

$$\mu_{trapezoidal}(x; a, b, c, d) \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & , c \leq x \leq d \\ 0 & , d \leq x \end{cases} \quad (2.20)$$

Donde a, b, c y d representa la coordenada del eje horizontal de los vértices del trapecio formado. Un ejemplo de la función trapezoidal usando el software MatLab es la función `trapmf(x,{2 4 6 8})`, se ve en la figura 2.10. (Pantoja Laces, 2013, p.26)

Figura 2.10. Función trapezoidal.



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

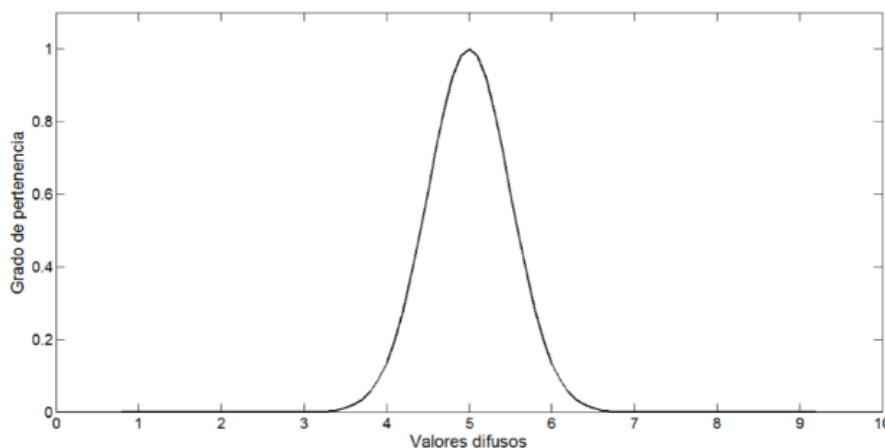
2.4.2.3. Función Gaussiana

La función Gaussiana se define con la ecuación 2.21.

$$\mu_{gaussiana}(x; \sigma, a) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (2.21)$$

Donde μ corresponde al centro de la campana gaussiana y σ la anchura de la curva. La Figura 2.11 representa un ejemplo de esta función de pertenencia usando el software MatLab. con la función `gaussmf(x{0.5 5})` (Pantoja Laces, 2013, p.27)

Figura 2.11. Función Gaussiana



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

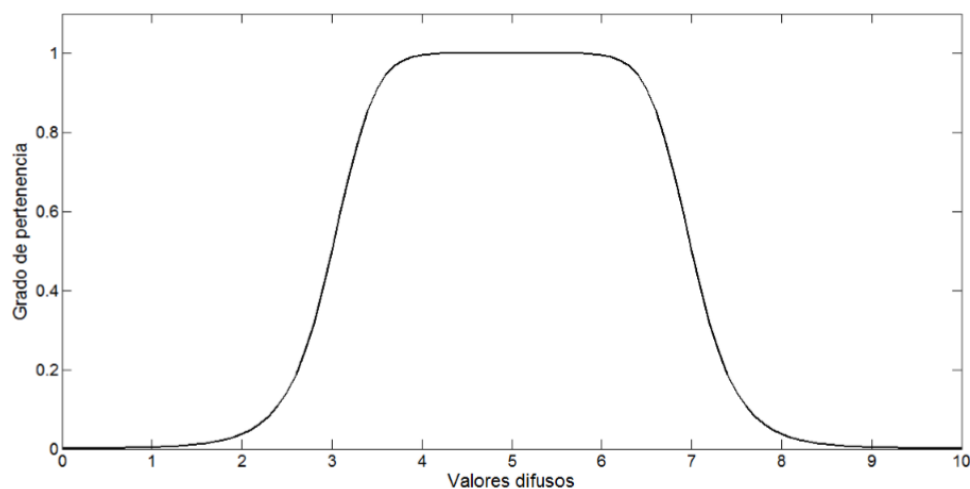
2.4.2.4. Función campana

La función campana está definida como se muestra en la ecuación 2.22.

$$\mu_{campana}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.22)$$

Donde a corresponde al vértice inicial de (eje horizontal), b representa la proporción en la anchura de la campana y c representa el centro de la campana (eje horizontal). Un ejemplo de la función campana usando el software MatLab con la función `gbellmf(x, {2 4 5})` se muestra en la figura 2.12. (Pantoja Laces, 2013, p.28)

Figura 2.12. Función Campana.



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

Estas funciones de pertenencia son algunas de las más usadas y el criterio de selección se ha dejado a criterio de los diseñadores y expertos en sistemas difusos, cuyo objetivo es escoger la función de pertenencia óptima que proporcione mejores resultados.

2.4.3. Sistemas difusos

Los sistemas difusos son sistemas basados en conocimiento humano, donde la parte esencial de un sistema difuso es la base de conocimientos que consiste de reglas difusas que tienen la forma:

si antecedente entonces consecuente

La primera parte de la regla se denomina antecedente y contiene una o varias condiciones referidas a las entradas del sistema; la segunda parte de la regla es denominada consecuente y es la acción a ejecutarse. (Pantoja Laces, 2013, p. 29)

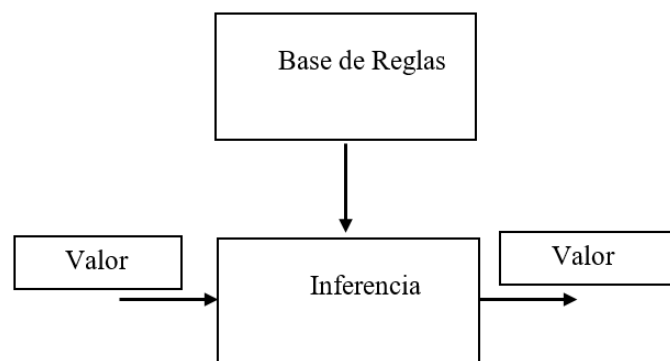
2.4.3.1. Diseño de sistemas difusos

Para el diseño de sistemas difusos se tiene en cuenta que existen diferentes tipos de sistemas difusos, entre los más populares y usados están los sistemas difusos puros, los sistemas del tipo Mamdani y los del tipo Sugeno.

2.4.3.2. Sistemas difuso puro

La configuración básica de un sistema difuso puro se muestra en la figura 2.13, el problema principal con los sistemas difusos puros es que sus entradas y sus salidas son palabras en lenguaje natural, por lo que no tiene un marco matemático de trabajo formal y en la resolución de problema de sistemas en ingeniería, las entradas y salidas son variables representadas con valores reales. (Ortiz Rodriguez, 2004, p. 15)

Figura 2.13. Sistema difuso Puro.



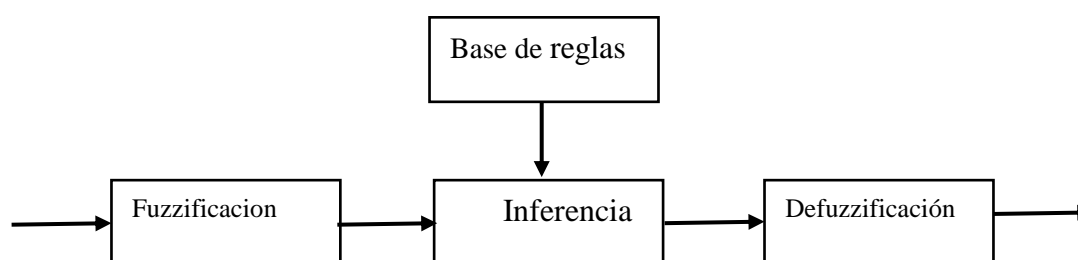
Elaboración: propia

Por lo que su uso en aplicaciones industriales no es recomendado y su uso se centra a las expresiones lingüísticas de las personas.

2.4.3.3. Sistema Difuso Mamdani

Este sistema difuso es el más usado cuando se trabaja con la metodología Fuzzy y fue uno de los primeros sistemas de control que utilizo conjuntos difusos. El método de Mamdani fue propuesto en 1975 por Ebrahim Mamdani y está compuesto de los elementos mostrados en la figura 2.14. (Pantoja Laces, 2013, p.31)

Figura 2.14. Sistema difuso Tipo Mamdani.



Elaboración: propia

A continuación, se describe cada elemento que conforma a este tipo de sistema difuso para dar una mejor idea de la interpretación de este sistema.

2.4.3.3.1. Fusificación.

En general, la fuzzificación es el proceso mediante el cual se transforma un valor numérico concreto de una variable de entrada en un conjunto difuso que representa dicho valor.

El primer paso consiste en tomar las entradas y determinar el grado al que ellos pertenecen con respecto a cada uno de los conjuntos difusos apropiados y la entrada siempre es un valor numérico limitado al universo del discurso de la variable de entrada.

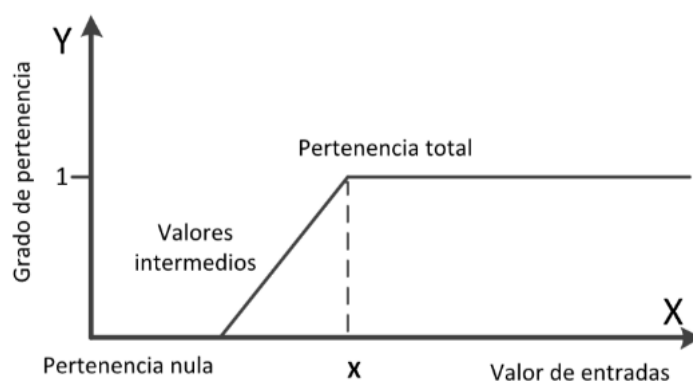
Los fuzzificadores se pueden clasificar en dos categorías: el fuzzificador unitario y el no unitario. Un fuzzificador unitario produce un conjunto el cual se reduce a un punto, el

correspondiente al valor preciso de la entrada y tiene grado de pertenencia máximo. Los restantes puntos del universo no pertenecen al conjunto en ningún grado. Para ello, se utiliza una función de pertenencia doblemente evaluada, ver la ecuación 2.23. (Pantoja Laces, 2013, p.31-32)

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = y \in Univ \\ 0 & \text{si } x \neq y \in Univ \end{cases} \quad (2.23)$$

Un fuzzificador no unitario produce un conjunto difuso cuyo marco de trabajo contiene más de un punto. En estos fuzzificadores, el valor de pertenencia es máximo $\mu(x) = 1$ para $x = y$. Si la variable x se aleja de y , el valor de pertenencia decrece, ver Figura 2.15. (Pantoja Laces, 2013, p.32)

Figura 2.15. Valor de pertenencia del fuzzificador no unitario.



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

2.4.3.3.2. Base de reglas

La base de reglas es un conjunto de reglas difusas expresadas en forma lingüística. Estas expresiones son utilizadas para establecer relaciones causa-efecto entre dos proposiciones difusas las cuales son expresadas mediante variables lingüísticas y se expresan generalmente como:

si proposicion A entonces propocision B

En la teoría de control se estudian estas expresiones con la siguiente forma:

si A es B entonces C es D

Interpretando la expresión, se observa que la relación difusa está definida en los dominios de las variables lingüísticas A y C por lo que el grado de verdad de la implicación es:

- El antecedente de la proposición es A es B y es representado por un conjunto difuso B.
- El consecuente de la proposición es C es D y es representado por el conjunto D.

El significado de la evaluación de la expresión es una relación difusa que se expresa de la siguiente manera, ver ecuación 2.24 (Pantoja Laces, 2013, p.33)

$$\mu(A, C) = \mu(A, B) \cdot \mu(B, C) \quad (2.24)$$

En donde el operador puede ser un simple producto cartesiano o algún operador de implicación difuso. Si el antecedente o el consecuente son proposiciones compuestas, entonces se calcula primeramente la función de pertenencia de la proposición compuesta y el operador es aplicado a las funciones de pertenencia resultantes. Por lo que cualquier operación o relación en lógica difusa corresponde a operaciones y relaciones entre funciones de pertenencia que dan como resultado otras funciones de pertenencia (Pantoja Laces, 2013, p.33)

2.4.3.3.3. Inferencia

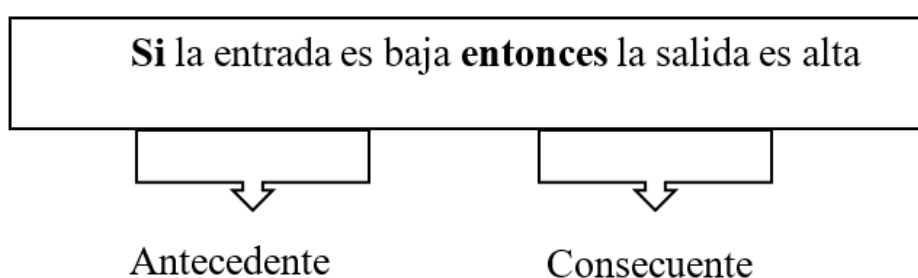
Los sistemas difusos Mamdani reciben este nombre debido al método de inferencia que utiliza en este caso Mamdani. El mecanismo de inferencia es el encargado de disparar las reglas, es decir, obtener una salida difusa a partir de una entrada difusa. Existen dos tipos de inferencia, las cuales son (Rios Rivas, 2005, p.76)

Inferencia basada en composición: las relaciones difusas que representan el significado de cada regla individual son agregadas a la relación difusa que describe el significado del conjunto de reglas. Esta operación se realiza mediante la composición entre la entrada fusificada y la relación que describe el significado del conjunto de reglas. El resultado de la composición es el conjunto difuso que describe el valor de la salida de control. (Rios Rivas, 2005, p.76)

Inferencia basada en el disparo individual: en este caso, cada regla se dispara individualmente. El disparo puede interpretarse como el cómputo del grado de pertenencia que se asigna a la entrada no difusa en la función de pertenencia que describe el antecedente de la regla y enganchar el conjunto difuso que describe el significado de la consecuencia de la regla con el grado al cual el antecedente de la regla ha sido asociado por la entrada no difusa. Finalmente, los valores enganchados (o recortados) para la salida de control son agregados para formar la salida final. (Rios Rivas, 2005, p.76)

El método Mamdani utiliza reglas tipo Si-entonces. Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes: el antecedente y la conclusión, como se observa en la Figura 2.16. En un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados bajo la forma de la expresión de la regla. (Pantoja Laces, 2013, p.34)

Figura 2.16. Regla Si-entonces Mandani



Elaboración: Propia

2.4.3.3.4. Defusificación

Es el método por el cual una entrada difusa se convierte en una salida no difusa, es decir, un valor físico que ha sido procesado y puede ahora pasar a las siguientes etapas de control. Existen muchos métodos de defusificación, sin embargo, en la literatura referente a control difuso son seis los principales métodos, los cuales se describirán a continuación. (Rios Rivas, 2005, p.77)

2.4.3.4. Tipos de defusificación

2.4.3.4.1. Centro de área o centro de gravedad

Este método encuentra el centro del área del conjunto difuso que resulta de combinar todos los conjuntos difusos obtenidos en el disparo individual de reglas. Este método toma el área del conjunto resultante como un todo, es decir que, si dos conjuntos individuales se traslapan entre sí, este hecho no se toma en cuenta, esto se ve en la ecuación 2.25 (Rios Rivas, 2005, p.77)

$$f_{COA} = \frac{\sum_{i=1}^l f_i \cdot u(f_i)}{\sum_{i=1}^l u(f_i)} \quad (2.25)$$

Donde f_{COA} representa la coordenada del centro de área, f_i son los distintos valores que puede tomar la salida f y μ representa el conjunto difuso obtenido al aplicar el procedimiento de inferencia. Este método es el más utilizado en los procesos de control y se ha aplicado a un sin número de proyectos que realizan control difuso.

Un ejemplo numérico basado en la figura 2.17 es el siguiente: (Pantoja Laces, 2013, p.35-36)

Se tiene tres funciones A, B y C de pertenencia que representa conjuntos de salida, los cuales tienen los siguientes parámetros en los rangos de los conjuntos.

$LimiteizquierdoA = 0,2$ $centroA = 0,275$ $LimitederechoA = 0,35$

$LimiteizquierdoB = 0,5$ $centroB = 0,6$ $LimitederechoB = 0,7$

$LimiteizquierdoC = 0,8$ $centroC = 0,9$ $LimitederechoC = 1$

La ponderación de cada conjunto de salida es:

$$PondA = 0,8$$

$$PondB = 0,7$$

$$PondC = 0,5$$

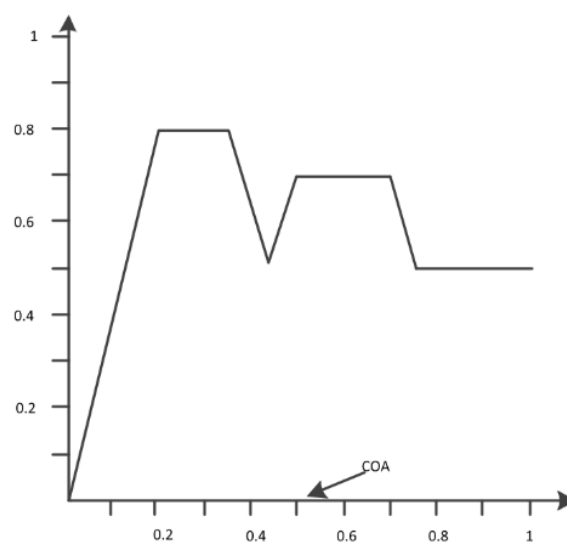
Para realizar el método COA se establece la siguiente formula ecuación 2.26:

$$f_{COA} = \frac{CentroA.PndA+CentroB.PondB+CentroC.PondC}{PondA+PondB+PondC} \quad (2.26)$$

Sustituyendo en la formula

$$f_{COA} = \frac{0,275 * 0,8 + 0,6 * 0,7 + 0,9 * 0,5}{0,8 + 0,7 + 0,5} = 0,54$$

Figura 2.17. Ubicación grafica del valor de salida usando COA

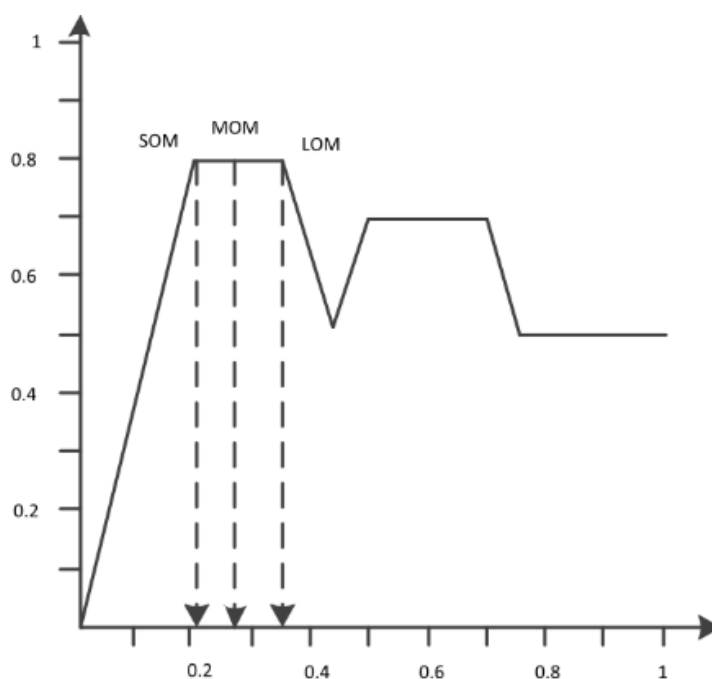


Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

2.4.3.4.2. LOM, SOM y MOM

Estos métodos de defuzzificación utilizan el valor máximo del conjunto total resultante. Más largo del máximo (LOM) utiliza el valor máximo, el más pequeño (SOM) utiliza el valor mínimo y el promedio (MOM) utiliza el valor medio entre SOM y LOM. Si el conjunto resultante posee un solo valor máximo, entonces los tres valores son iguales, pero si posee un intervalo de valores máximos estos valores son distintos. (Rios Rivas, 2005, p.80)

Figura 2.18. Ubicación de SOM, MOM y LOM

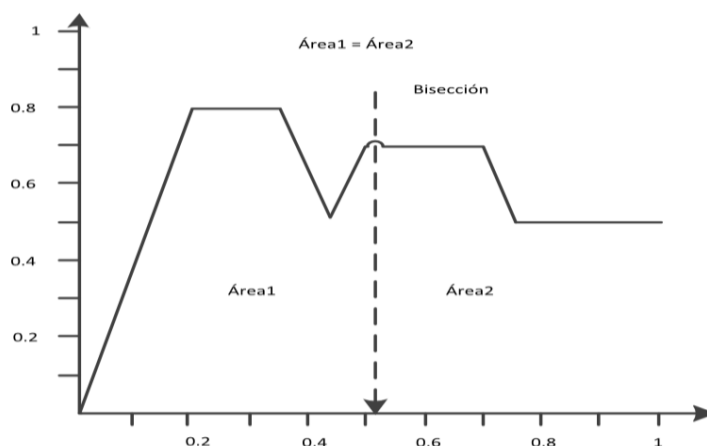


Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

2.4.3.4.3. Bisección

Consiste en encontrar el punto para el cual, si se traza una línea vertical, el conjunto resultante queda dividido en dos regiones cuyas áreas son iguales, ver Figura 2.19 (Rios Rivas, 2005, p.81)

Figura 2.19. Ejemplo grafico de bisección



Fuente: (Pantoja Laces, 2013)

2.4.3.5. Sistema difuso Sugeno

En 1985, Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado de Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa al método de Mamdani. Se trata de un método basado en reglas difusas, pero en el que el consecuente no nos da un conjunto difuso sino una serie de funciones lineales. Este modelo es útil para sistemas complejos y de dimensiones mayores que los que podemos resolver por el método de Mamdani. (Diciembre Sanahuja, 2017, p. 55)

Sean A_i y B_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, conjuntos difusos de nuestro sistema. Las reglas tendrían la siguiente forma:

$$R_1: \text{si } x \text{ es } A_1 \wedge y \text{ es } B_1 \text{ entonces } z = f_1(x, y)$$

$$R_2: \text{si } x \text{ es } A_2 \wedge y \text{ es } B_2 \text{ entonces } z = f_2(x, y)$$

-

-

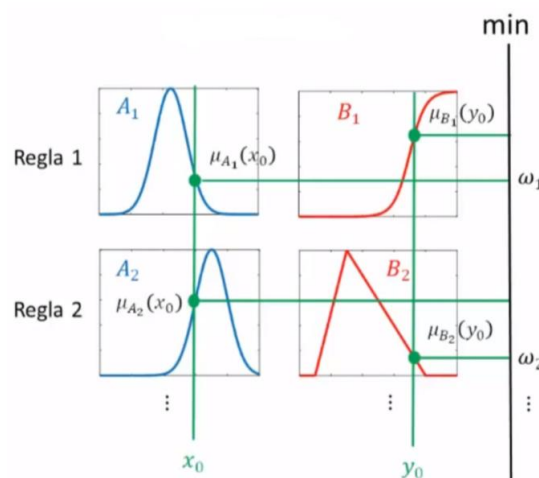
$$R_n: \text{si } x \text{ es } A_n \wedge y \text{ es } B_n \text{ entonces } z = f_n(x, y)$$

La principal diferencia que presenta el método TSK respecto al de Mamdani es que no es necesario realizar un proceso de defuzzificación. Esto se debe al hecho de que no obtenemos ningún conjunto difuso sino un conjunto de funciones lineales. Así, en el método TSK podemos obtener directamente el valor de salida de sistema con una expresión del tipo: ecuación 2.27. (Diciembre Sanahuja, 2017, p. 55)

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2.27)$$

Donde el valor ω_i se obtiene calculando el mínimo de los valores de entrada en cada regla R_i (ver Figura 2.20).

Figura 2.20. Cálculo de los componentes ω_i

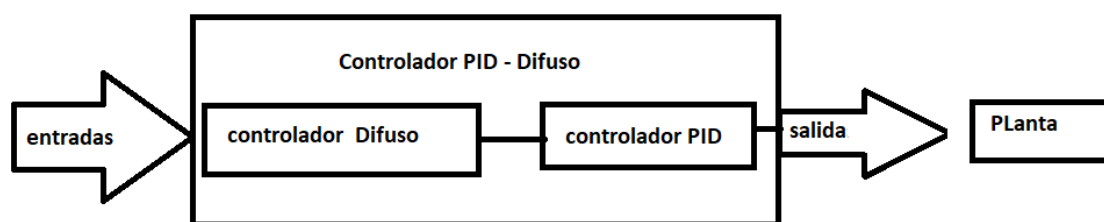


Fuente: (Diciembre Sanahuja, 2017, p. 56)

2.5. CONTROLADOR PID DIFUSO

El nombre PID – difuso se utiliza para describir la unión de dos tipos de controladores, un controlador difuso y un controlador PID distribuidos en serie en ese orden.

Figura 2.21. Diagrama de bloques de un control PID - Difuso.



Elaboración: Propia

En el controlador PID – Difuso se tiene primero al controlador difuso que tiene dos entradas (el error y la derivada del error) y tres salidas (K_p, τ_i, τ_d) que son las constantes del controlador PID. En donde la base de reglas determina los valores de las constantes del control PID y su respectiva salida nos da la variable manipulada para el control del sistema. (Rios Riva, 2005, p. 98)

2.5.1. Sintonización del controlador PID – Difuso

El método de ajuste consiste en transferir los parámetros de un controlador PID (ajustado por cualquier técnica) a un controlador difuso (Pantoja Laces, 2013, p. 40) en rangos para las funciones de pertenencia que el diseñador vea mas conveniente a utilizar para distintos procesos de plantas.

2.6. MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales (Creus Solé, 2010, p. 195), especialmente en la industria química de tratamiento de aguas y almacenamiento de líquidos en tanques

De acuerdo con Calderón & Sánchez (2004), la medición puede ser realizada por comparación (directa o indirecta), para lo cual es necesario utilizar un medio físico para determinar la magnitud de una cantidad o variable.

2.6.1. Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, bien aprovechando características eléctricas del líquido o bien utilizando otros fenómenos. (Creus Solé, 2010, p. 195)

Los aparatos que miden el nivel se dividen en tipos según (Creus Solé, 2010, p. 195) aprovechando la presión hidrostática son:

- Medidor manométrico
- Medidor de tipo burbujeo
- Medidor de presión diferencial de diafragma

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento.

Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido son:

- Medidor resistivo/conductivo
- Medidor capacitivo
- Medidor ultrasónico
- Medidor de radar o microondas
- Medidor de radiación • Medidor de láser

Y los que se basan en otros fenómenos:

- Medidor óptico
- Vibratorio

- Detector de nivel térmico o de dispersión térmica

2.7. SENSORES

Un sensor es un dispositivo para localizar y establecer una condición de cambio. Con frecuencia, una condición de cambio, se trata de la presencia o ausencia de un objeto o material (detección discreta). También puede ser una cantidad capaz de medirse, como un cambio de distancia, tamaño o color (detección analógica). Los sensores posibilitan la comunicación entre el mundo físico y los sistemas de medición y/o de control, tanto eléctricos como electrónicos, utilizándose extensivamente en todo tipo de procesos industriales y no industriales para propósitos de monitoreo, medición, control y procesamiento. (Gutiérrez Hinestroza & Iturralde Kure, 2017)

2.7.1. Campo de medida.

El campo de medida (range) es el espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. (Creus Solé, 2010, p. 4)

2.7.2. Alcance

El alcance (span) es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. (Creus Solé, 2010, p. 4)

2.7.3. Error

El error de la medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las

imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso. Es decir:

Error = Valor leído en el instrumento - Valor ideal de la variable medida

El error absoluto es:

Error absoluto = Valor leído - Valor verdadero

El error relativo representa la calidad de la medida y es:

Error relativo = Error absoluto / Valor verdadero. (Creus Solé, 2010, p. 5)

2.7.4. Incertidumbre de la medida

Cuando se realiza una operación de calibración, se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error (diferencia entre el valor leído por el instrumento y el verdadero valor medido con el aparato patrón) se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o incertidumbre (uncertainty). (Creus Solé, 2010, p. 6)

2.7.5. Exactitud

La exactitud (accuracy) es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida.

En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero. El grado de conformidad independiente es la desviación máxima entre la curva de calibración de

un instrumento y una curva característica especificada, posicionada de tal modo tal que se reduce al mínimo dicha desviación máxima. (Creus Solé, 2010, p. 14)

2.7.6. Precisión

La precisión (precisión) es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión. A señalar que el término precisión es sinónimo de repetibilidad. (Creus Solé, 2010, p. 16)

2.7.7. Zona muerta

La zona muerta (dead zone o dead band) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. (Creus Solé, 2010, p. 16)

2.7.8. Sensibilidad

La sensibilidad (sensivity) es la razón entre el incremento de la señal de salida o de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. (Creus Solé, 2010, p. 16)

2.7.9. Repetibilidad

La repetibilidad (repeability) es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida del instrumento, al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. La repetibilidad es sinónimo de precisión. A mayor

repetibilidad, es decir, a un menor valor numérico (por ejemplo, si en un instrumento es 0,05% y en otro es 0,005%, este segundo tendrá más repetibilidad), los valores de la indicación o señal de salida estarán más concentrados, es decir, habrá menos dispersión y una mayor precisión. (Creus Solé, 2010, p. 16)

2.7.10. Histéresis

La histéresis (hysteresis) es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento o la señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. (Creus Solé, 2010, p. 17)

2.8. EL SENSOR ULTRASÓNICO DE DISTANCIA HC-SR04

El sensor HC-SR04 es un sensor de distancia de bajo costo que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 2 a 450 cm. Destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, buena precisión y excelente precio. El sensor HC-SR04 es el más utilizado dentro de los sensores de tipo ultrasonido, principalmente por la cantidad de información y proyectos disponibles en la web. De igual forma es el más empleado en proyectos de robótica como robots laberinto o sumo, y en proyectos de automatización como sistemas de medición de nivel o distancia. (Sensor Ultrasonido HC-SR04, s.f.)

Constan de un medidor de ondas sonoras de alta frecuencia (entre 20 y 40 kHz) que se propaga por la fase gas hasta que choca con el líquido o sólido, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor.

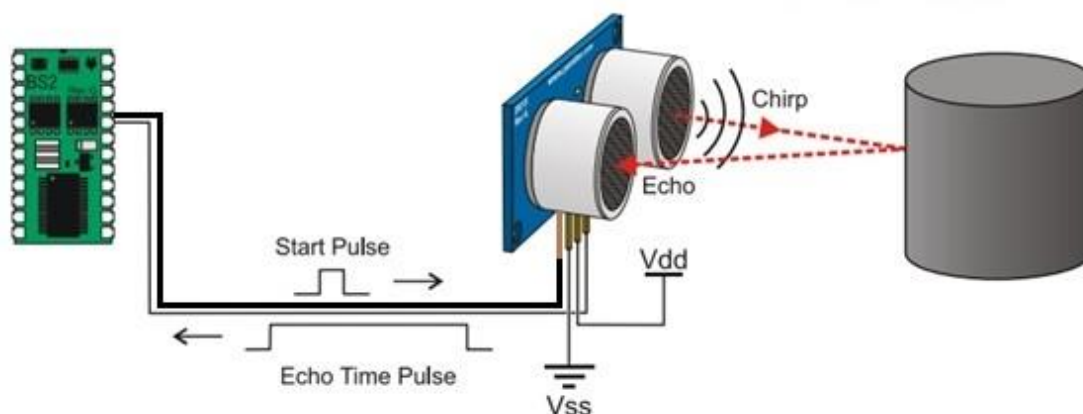
El tiempo entre la emisión de la onda y la recepción del eco es inversamente proporcional al nivel.

El tiempo depende de la T^a , por lo que hay que compensar las medidas.

Hay que evitar que existan obstáculos en el recorrido de las ondas, aunque algunos medidores compensan los ecos fijos debidos al perfil del depósito.

Sensibles al estado de la superficie del líquido (espumas).

Figura 2.22. Sensor de nivel (Arduino)



Elaboración: Propia

El silbido del sensor Ping))) no es audible porque 40 kHz es una frecuencia ultrasónica.

Lo que valoramos sonido es la habilidad de nuestro oído interno para detectar las variaciones de la presión del aire producida por una vibración. El nivel de estas variaciones determina el timbre del tono. Los tonos de alta frecuencia surgen en sonidos de mayor timbre y tonos de baja frecuencia surgen en tonos de menor timbre.

La mayoría de las personas podemos oír tonos que van desde los 20 Hz, el cual es un timbre muy bajo, a 20 kHz, el cual es un timbre muy agudo. Un sonido subsónico es aquel con frecuencias menores a 20 Hz, y un sonido ultrasónico es aquel con frecuencias por arriba de 20 kHz. Por lo que los silbidos del sensor Ping))) son a 40 kHz, definitivamente son ultrasónicos y no audibles.

2.9. PROCESAMIENTO Y DESARROLLO INDUSTRIAL

2.9.1. LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.)

LabVIEW es un entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medidas y presentaciones de datos.

LabVIEW es un lenguaje potente en un ambiente de programación gráfico, pero mucho más sencillo que los entornos tradicionales.

A diferencia de los lenguajes de propósito general, LabVIEW tiene funciones específicas para acelerar el desarrollo de aplicaciones de medición, control y automatización.

LabVIEW se puede conectar de manera transparente con todo tipo de hardware incluyendo instrumentos, plaquetas adquisidoras, controladores lógicos programables (PLCs).

Puede utilizarse LabVIEW para analizar y registrar resultados reales para aplicaciones en amplios sectores orientados a la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica, biomédica, etc.

Puede utilizarse LabVIEW para numerosas aplicaciones de control de procesos y automatización, realizar medidas y control de alta velocidad y con muchos canales. (Instrumentación Virtual con LabView)

2.9.2. NI myRIO-1900

Myrio tiene 3 puertos, usualmente se usa para experimentación, para pruebas, para prototipos las pruebas van a ser lo más rápido posible

Esta elaborado para hacer pruebas para laboratorios no está elaborado para uso industrial.

2.10. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

2.10.1. Control pid avanzado

El controlador PID tiene tres términos. El termino proporcional P corresponde a el control proporcional. El termino integral I da una acción de control que es proporcional a la integral del error. Esto asegura que el error en estado estacionario se haga cero. El término derivado D es proporcional a la derivada del error de control. Este término permite la predicción del error futuro. Hay muchas variaciones del algoritmo PID básico que sustancialmente mejoran su comportamiento y capacidad de operación. (Karl j.& Tore Haggliund, 2009)

2.10.2. Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID difuso en lógica reconfigurable

En la actualidad, la tecnología está en constante avance y el campo de control automático no es la excepción, ya que hoy en día se requieren sistemas inteligentes para controlar múltiples procesos, algunos de estos procesos requieren también alta velocidad de procesamiento por lo que la exploración hacia el uso de dispositivos FPGAs se encuentra en una tendencia creciente. (Pantoja Laces, 2013)

2.10.3. Control difuso para un sistema de nivel implementado en un autómata programable

Los controladores PID gracias a su estructura sencilla son ampliamente usados en el control de procesos industriales, además permiten una relativa facilidad en el ajuste de

sus parámetros; tienen como deficiencia su dinámica lineal, por lo cual presentan bajos desempeños en control de procesos con características no lineales. (Gutiérrez Marroquin & Lopes Sotelo, 2016)

2.10.4. Diseño e implementación de un sistema de control por computador en tiempo real de flujo y nivel de agua, utilizando la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), variador de velocidad y programación LabView.

La Tesis se basa en el Diseño e Implementación de un Sistema de Control por computador en tiempo real que permite determinar el flujo y Nivel de agua debido a perturbaciones internas y externas en una Planta (Tanque Principal), utilizando el software LABVIEW que es un Software Scada que permite el control, supervisión y adquisición de datos más la propiedad de diseñar nuestros propios sistemas mediante modelos matemáticos. (Perez Limachi & Canaza Zavala, 2009)

2.10.5. diseño e implementación de un sistema scada para el control de nivel y temperatura del tanque de agua caliente de la planta de procesos análogos (PPA)

El laboratorio Especializado Sistema Altamente Automatizado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, ubicada en la localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá-Colombia), cuenta con una planta didáctica que recibe el nombre de Planta de Procesos Análogos (PPA), la cual se desarrolló por parte de los estudiantes para la materia de Instrumentación de Procesos II del Programa de Ingeniería en Control. (Arias Alvarado, 2015)

2.10.6. Control pid con sintonización difusa y control difuso.

En esta tesis se presenta una metodología para sintonizar automáticamente las ganancias de un controlador PID (Proportional Integral Derivative). Los valores de la ganancia fueron ajustados con base en las propiedades estocásticas del error originado respecto al modelo de referencia seleccionado. El Teorema del Limite Central fue aplicado a un conjunto de muestras del error para estimar un nivel de error medio descrito en un intervalo de confianza y relacionado con un grado de confianza. El nivel de error estimado y su grado de confianza fueron usados para asignar los valores k_p , k_d y k_i usando un esquema de lógica difusa. Esta metodología fue probada en un motor de CD (corriente directa) con excitación separada, cuyos resultados fueron simulados en Matlab y comparados con un controlador PID convencional sintonizado por el método Ziegler-Nichols y un esquema difuso tipo I, observando mejores índices de rendimiento en comparación con otros. Por lo tanto, es posible asignar valores de sintonía al controlador PID convencional en un sentido de distribución, debido a que este enfoque describe la dinámica del error en casi todos los puntos. Los valores de sintonía apropiados son seleccionados mediante un esquema Mamdani con base al grado de confianza obtenido de una muestra de error, lo que permite adaptar parámetros de sintonía PID en un sentido difuso y minimizar la SNR (Signal Noise Ratio). (Gonzales de Leon, 2013, p. 4)

2.10.7. Desarrollo de una herramienta computacional para la implementación de estrategias de control.

Uno de los problemas que se tiene en la industria es que no siempre es posible el Monitoreo de las variables del proceso, lo cual dificulta el control de las más importantes. Para realizarlo es necesario instrumentar el proceso, y un equipo de cómputo que permita el monitoreo y control. En este trabajo se realiza el desarrollo e implementación de

estrategias de control en un proceso real para establecer el control de temperatura en un intercambiador de calor. Para ello fue necesario desarrollar la comunicación entre un sistema de adquisición de datos y una computadora. Se desarrolló una interface hombre-máquina que permite el monitoreo y control de las variables del proceso. Se implementaron dos controladores, un controlador PID y un controlador PID difuso. El controlador difuso desarrollado se diseñó con base al método de prueba y error. El controlador PID se ha sintonizado heurísticamente. Se realizaron experimentos en tiempo real, medicando de forma heurística los parámetros de los controladores para encontrar el mejor desempeño del proceso ante cambios en referencia y perturbaciones. Se define el diseño de los experimentos a realizar para probar la operabilidad de la interfaz y se comparó el desempeño de los controladores. Se comprobó el funcionamiento y operabilidad de una interface hombre-máquina que permite el monitoreo y control de las variables de un intercambiador de calor. Se realizó un análisis sobre la contabilidad del sistema implementado. (Gonzales Conzuelo, 2007)

2.10.8. Diseño y construcción del sistema de control para un intercambiador de calor tubular.

Este documento presenta una propuesta de dos tipos de control para un prototipo de laboratorio de transferencia de calor. El desarrollo del sistema de control se basa en el monitoreo de dos variables de entrada (presión, flujo) y una variable de salida (temperatura), esto permite el uso de la estrategia de control en cascada y alternativamente el desarrollo de un controlador difuso; los cuales son realizados en el entorno de programación gráfica de LabView y una tarjeta de adquisición de datos modelo NI USB-6008, cuyas características permiten la recolección de datos de las variables y presenta su salida en formato digital a 16 bits para su posterior conversión a una señal analógica de

tipo industrial (4 mA a 20 mA). El sistema SCADA recopila los datos y los muestra en una interfaz de usuario, además de generar un reporte con datos históricos y análisis de la información. (Saldaña Zamara & Santos Espinoza & Zuñiga Cortes, 2013)

2.10.9. Control difuso vs. control pid: análisis y numeración numérica.

En este trabajo de tesis se presenta la evaluación y análisis de dos diferentes tipos de controladores, aplicados a la regulación de nivel de líquidos en un tanque, del cual se drena de forma constante un cierto volumen de dicho líquido. Al tanque se alimenta el líquido por medio de una servoválvula la cual es el elemento de control (Actuador) para mantener el nivel de referencia deseada por el usuario. El primer controlador analizado consiste de un controlador que es exactamente usado en la industria actual: el control PID. Para que este controlador funcione de una forma adecuada se tiene que sintonizar las ganancias proporcional, integral y derivativa. El segundo controlador difuso o inteligente, que realiza el control de nivel del líquido en el tanque por medio de una serie de reglas y una máquina de inferencia, y se toma decisiones que normalmente aplicaría un experto humano. El control se realiza reduciendo el error entre la referencia deseada y la salida del sistema. (Ruiz Alcantara , 2007)

2.10.10. Control difuso para la operación de un sistema de generación de energía eléctrica basado en celdas de combustible tipo pem.

La lógica difusa ha llegado a ser rápidamente una de las tecnologías más exitosas en la actualidad para desarrollar sistemas de control. Con su ayuda, los requerimientos muy complejos pueden ser implementados en un control simple, barato y de fácil mantenimiento. El control difuso tiene como objetivo realizar el análisis y diseño de sistemas de control basados en sistemas de inferencia difuso, los cuales permiten

transformar el conocimiento sobre el control de una planta, expresado en forma de regla SI-ENTONCES, en una relación matemática para el cálculo de acciones de control a partir de mediciones de la planta. Una regla difusa puede reemplazar varias reglas convencionales. Y puesto que la lógica difusa crea un sistema de control al combinar reglas y conjuntos difusos, esto permite a los diseñadores construir controladores aun cuando no tengan un entendimiento total del sistema. Un sistema de inferencia emula los mecanismos del razonamiento humano para obtener conclusiones validas empleando un conjunto de reglas del procedimiento del tipo SI-ENTONCES. Si a un sistema de inferencia le añadimos un fuzificador y un defuzificador se forma un sistema difuso capaz de procesar entradas y salida numéricas reales. Lofti Zadeh propuso que muchos conjuntos en el mundo que nos rodea no están definidos por límites iguales. Zadeh decidió extender los dos valores lógicos definidos por el par binario (0,1), a todo un intervalo continuo [0,1] y en consecuencia se introdujo un cambio gradual de lo falso a lo verdadero. (Vasquez Roman, 2004)

2.10.11. Modulo didáctico para el control de nivel de líquidos.

El módulo de control de nivel de líquidos es un equipo que permite realizar acciones de control sobre la variable nivel de líquido de un tanque a través de un sistema de control cuyo elemento principal es un PLC que comanda la apertura de una válvula ubicada a la salida del tanque desde un tanque de almacenamiento. Un sensor de presión diferencial que realiza una medición indirecta a través de una sonda llena de aire, determina la presión de la columna de líquido y proporciona una salida continua que permite determinar el nivel de líquido en el tanque. El PLC (Controlador Lógico Programable) es el encargado de ejecutar el proceso al ejecutar los lazos de control programados. El modulo ha sido diseñado para operar en modo manual, en el cual se tiene control

individual sobre cada parte del equipo, o automático el cual requiere el ingreso de un set-point de nivel deseado a fin de que se realicen las acciones de control. El ingreso de parámetros se lo puede realizar desde un panel de operado ubicado en la parte frontal del módulo o desde el computador por medio de una interfaz gráfica HMI (Human Machine Interface) que permite además la supervisión y adquisición de datos. (Benitez Cadena & Zalamea Balladares , 2017, p. 3)

2.11. HIPÓTESIS

En el entorno actual de industrialización de los procesos de producción se observa la constante implementación de sistemas de almacenamiento de líquidos de uso general o específico para todo tipo de industrial sea química, textil, metalúrgica, agrícola, etc. Allí nace la finalidad de este proyecto en el cual se pondrá en funcionamiento el prototipo ya existente en el laboratorio de control y automatización de la EPIME - UNA en el cual se analizará y aplicará la teoría de control para hacer una comparación entre un controlador PID y control PID difuso, con el fin de obtener un sistema seguro, inteligente e independiente para mayor eficiencia en dichos procesos.

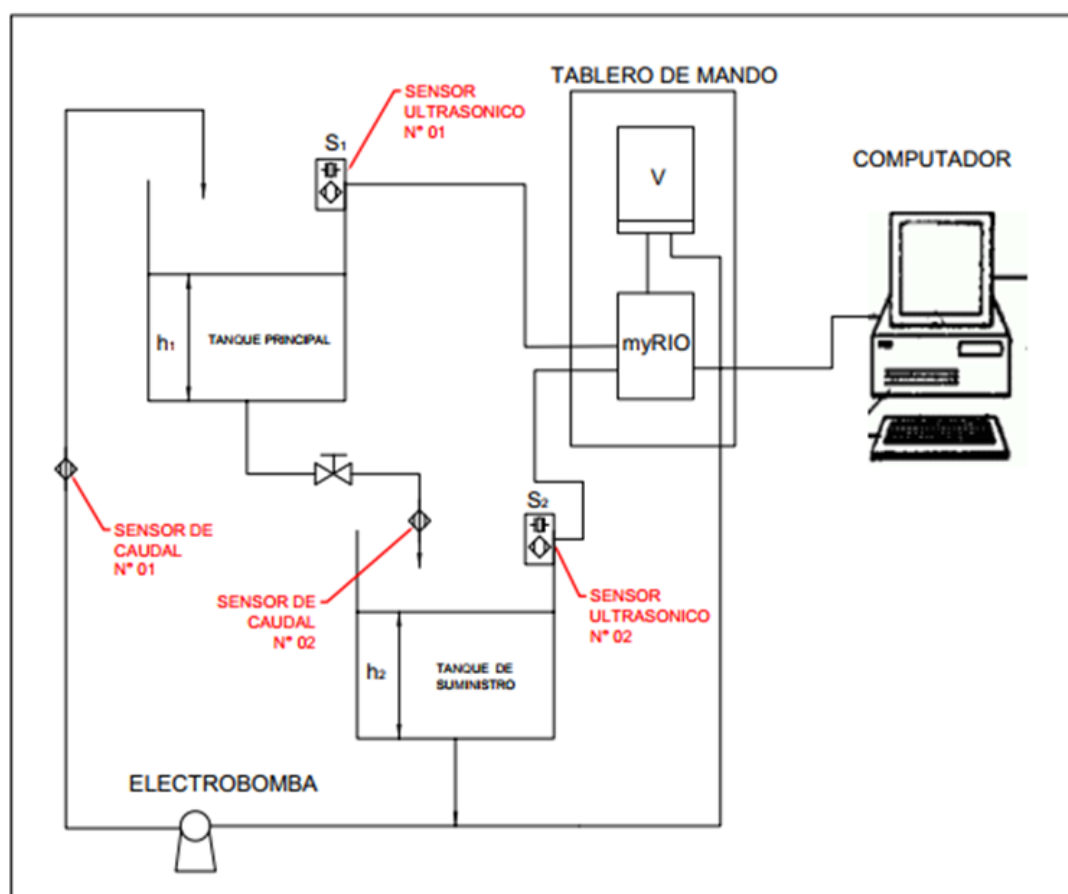
CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de control y automatización de la escuela profesional de Mecánica Eléctrica de la facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas de la Universidad Nacional del Altiplano.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.

Figura 3.1. Diagrama del proceso general de la planta.



Elaboración: Propia

El módulo consta de una estructura metálica que es la que hace de soporte para los tanques del sistema, bomba, gabinete y demás accesorios del módulo.

3.1.1. Características del bastidor

Tabla 3.1. características del bastidor

Características de construcción:	
Material	: Tubo. Cuadrado de $3/4'' \times 3/4''$
Color	: Azul Eléctrico
Dimensiones	: 1.50 x 1.50 x 0.35 m.

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.2. Elementos del bastidor

Elementos	Cantidad
Electro bomba	: 01 Unid.
Tanques	: 02 Unid.
Tablero de Control	: 01 Unid.

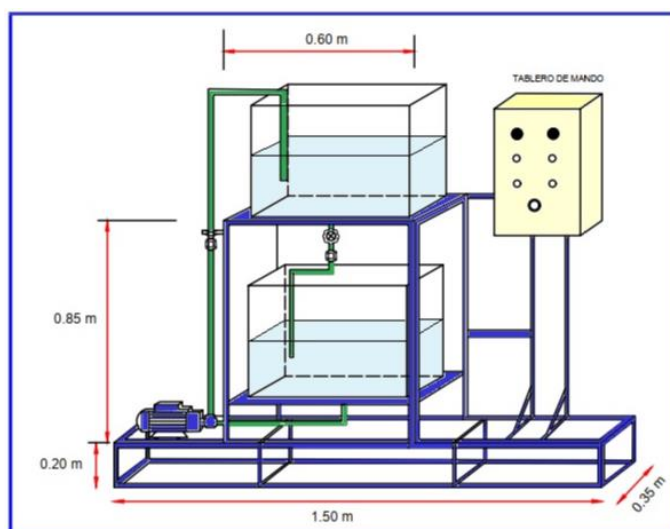
Elaboración: propia

Figura 3.2. Fotografía del módulo.



Elaboración: Propia

Figura 3.3. Características del Bastidor.



Elaboración: Propia

3.1.2. Características de los tanques

3.1.2.1. Descripción del tanque principal

En el tanque principal es donde se va a realizar el control del punto de operación del sistema, está hecho de acrílico.

Tabla 3.3. Características del tanque principal.

Construcción:	
Material	: Acrílico de 4.0 mm.
Color	: Transparente.

Elaboración: propia

Tabla 3.4. Dimensiones del tanque principal

Dimensiones

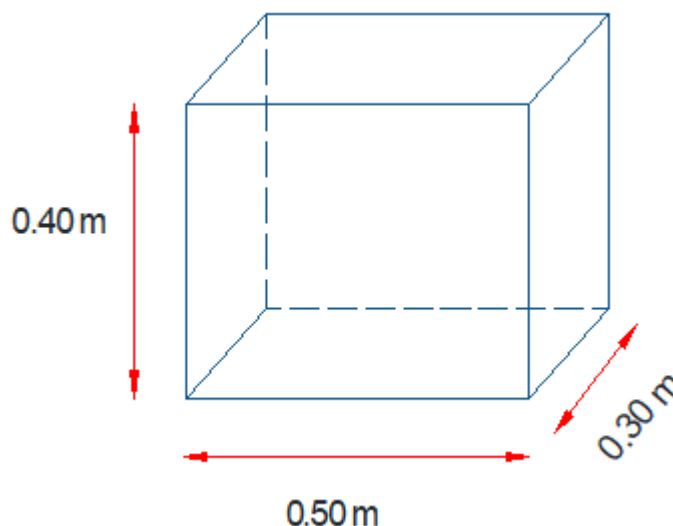
Ancho	: 0.30 m.
Largo	: 0.50 m.
Alto	: 0.40 m.

Elaboración: propia

Con estas dimensiones el tanque principal tiene volumen de 0.06 m³, que es igual a 60 litros de capacidad.

La capacidad efectiva del tanque al cual funcionará según sus dimensiones (0.30m x 0.50m x 0.35m) es de 0.0525 m³.

Figura 3.4. Dimensiones del tanque principal.



Elaboración: Propia

3.1.2.2. Descripción del tanque de suministro

En el tanque suministro es aquel que servirá para alimentar a nuestra bomba, está hecho de acrílico.

Tabla 3.5. Características del tanque de suministro.

Construcción:	
Material	: Acrílico de 4.0 mm.

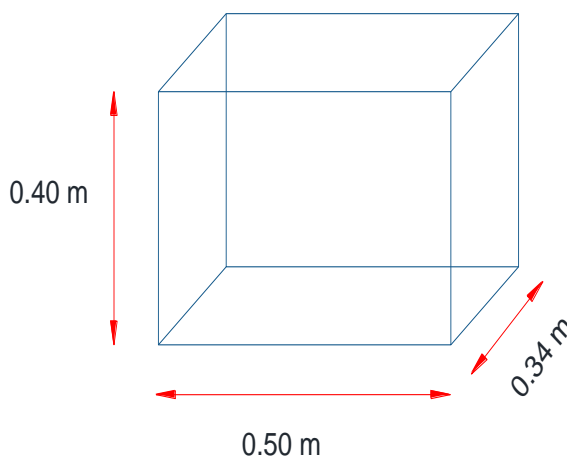
Color	: Transparente.
Elaboración: propia	

Tabla 3.6. Dimensiones del tanque de suministro.

Dimensiones	
Ancho	: 0.34 m.
Largo	: 0.50 m.
Alto	: 0.40 m.
Elaboración: propia	

Con estas dimensiones el tanque principal tiene volumen de 0.068 m³, que es igual a 68 litros de capacidad.

Figura 3.5. Dimensiones del tanque principal.



Elaboración: Propia

3.1.3. Características del motor

Tabla 3.7. Características del motor.

Placa de Características:	
Equipo	: Electro bomba

Marca	: Tipo HIDROSTAL
Potencia	: 0.5 HP
Voltaje	: 220 V
Amperaje	: 1.23 A
Frecuencia	: 60 Hz

Elaboración: propia

Figura 3.6. Fotografía del motor.



Elaboración: Propia

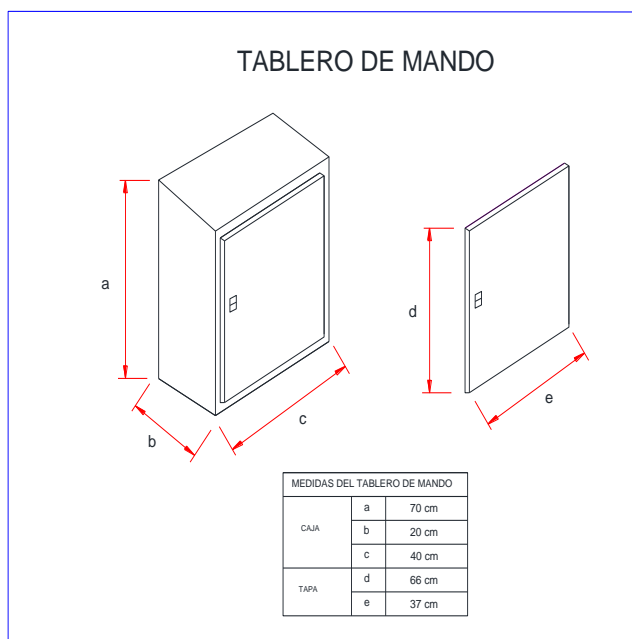
3.1.4. Características del gabinete

Tabla 3.8. Características del gabinete.

CARACTERÍSTICAS DEL GABINETE	
Material	: Plancha de Fe 1/32"
Color	: Gris RAL - 7032
Dimensiones	: 0.60 x 0.40 x 0.20 m. (h*b*a)
Cuerpo	: Caja + tapa extraíble

Elaboración: propia

Figura 3.7. Dimensiones del gabinete.



Elaboración: Propia

Figura 3.8. Fotografía de la parte exterior del gabinete.



Elaboración: Propia

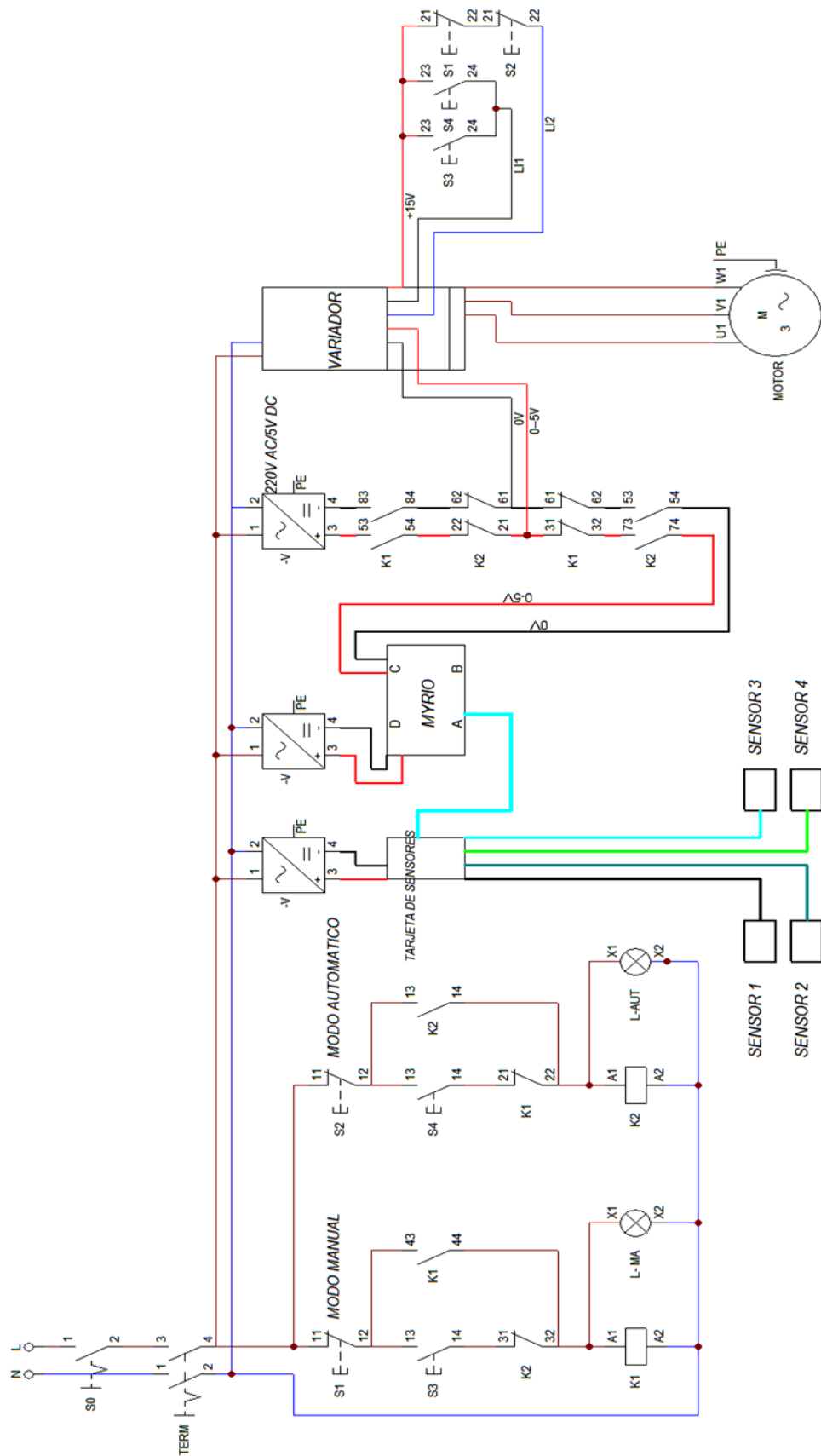
Figura 3.9. Fotografía de la parte interior del gabinete.



Elaboración: propia

3.1.5. Circuito de mando eléctrico ensamblado en el gabinete

Figura 3.10. Circuito del mando eléctrico.



Elaboración: Propia

3.1.6. Características del variador de velocidad

El variador de velocidad es de la marca TELEMECANIQUE modelo ATV11HU09M3A el cual tiene las siguientes características:

Tipo de carga: El tipo de carga será de par variable.

Tipo de motor: De inducción de rotor tipo jaula de ardilla.

Rangos de funcionamiento: Los rangos de velocidad considerados desde 0 hasta 3600 rpm.

Características nominales del motor: potencia de 0.5/0.37 HP/Kw 220Voltios, 1.22 Amperios, 60 Hz, Trifásico

Consideraciones de la red: Trabaja con una red monofásica de 220 voltios.

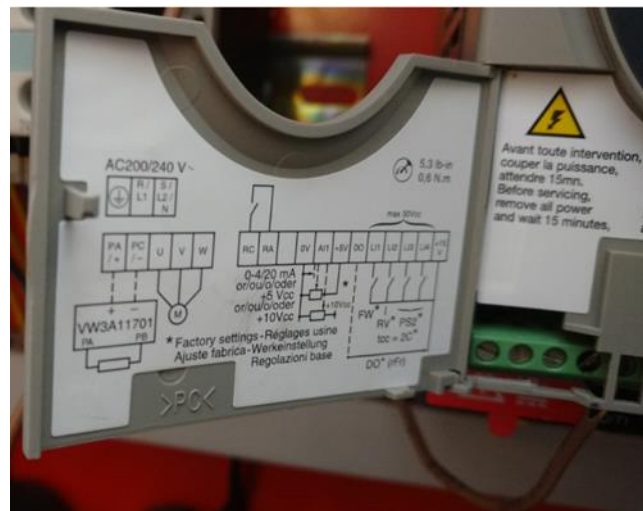
Condiciones ambientales: se estima que su temperatura ambiente al momento de realizar las pruebas es de 21° C y una humedad relativa de 55%, con una altura de 3850 m.s.n.m.

Figura 3.11. Fotografía del variador de velocidad.



Elaboración: Propia

Figura 3.12. Fotografía del diagrama de conexión del variador.



Elaboración: Propia

3.1.7. Configuración del variador de velocidad

Se configuro la minima velocidad del variador a 0 Hz y la maxima velocidad a 60 Hz.

Tiempo de rampa de aceleración (tiempo que se tarda en llegar desde velocidad cero a la frecuencia nominal ajustada) se establecio a 5 segundos para evitar la corriente pico o de arranque.

Tiempo de rampa de deceleración (tiempo que se tarda en llegar desde la frecuencia nominal ajustada a la velocidad cero) se establecio a 3 segundos para tener una parada suave del motor.

Modificamos el menu del variador “ACt” (escala de entrada analogica AI1) a 5V para obtener una entrada de 5voltios el cual sera suministrada por parte del myRIO el cual variará de forma automatica de acuerdo a la programacion hecha en el software labview.

3.2. CARACTERISTICAS DE LOS SENSORES

3.2.1. Características de los caudalímetros

Los sensores de flujo YF-S201, FS300A, FS400A son muy usados en varias aplicaciones, puesto que el flujo o caudal es parámetro necesario en varios procesos, a nivel doméstico lo podemos usar para medir el consumo de agua.

El sensor internamente tiene un rotor cuyas paletas tiene un imán, la cámara en donde se encuentra el rotor es totalmente aislado evitando fugas de agua, externamente a la cámara tiene un sensor de efecto hall que detecta el campo magnético del imán de las paletas y con esto el movimiento del rotor, el sensor de efecto hall envía los pulsos por uno de los cables del sensor, los pulsos deberán ser convertidos posteriormente a flujo pero esto ya es tarea del Arduino o controlador que se desee usar.

Se está utilizando para el funcionamiento de la planta dos sensores de caudalímetro los cuales son:

YFS201 que es de 30 litros por minuto

FS300A que es de 60 litros por minuto

Según sus tablas de conversiones:

El sensor funciona por pulsos por efecto hall.

Todos los modelos tienen tres cables para su conexión, rojo y negro para la alimentación y amarillo para la salida de los pulsos.

La salida de pulsos es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal. El factor de conversión de frecuencia (Hz) a caudal (L/min) varía entre modelos y depende de la presión, densidad e incluso del mismo caudal.

Para el caso del sensor de ½” el factor de conversión promedio proporcionado por el fabricante es:

$$f(\text{Hz}) = 7.5 \times Q(\text{L}/\text{min})$$

Para el caso del sensor de 3/4” el factor de conversión promedio proporcionado por el fabricante es:

$$f(\text{Hz}) = 5.5 \times Q(\text{L}/\text{min})$$

3.2.1.1. Características del caudalímetro YF-S201

Tabla 3.9. Características del Sensor de Caudal YF-S201

CARACTERÍSTICAS DEL CAUDALIMETRO YF-S201	
Tipo de sensor	: efecto Hall
Voltaje de trabajo	: 5 a 18 V CC (mínimo voltaje de trabajo probado 4.5V)
Consumo máximo de corriente	: 15 mA a 5 V
Tipo de salida	: 5V TTL
Velocidad de flujo de trabajo	: 1 a 30 litros / minuto
Rango de temperatura de trabajo	: -25 a + 80 °c
Rango de humedad de trabajo	: 35% -80% HR
Precisión	: ± 10%
Presión máxima de agua	: 2.0 MPa
Ciclo de trabajo de salida	: 50% + -10%
Tiempo de subida de la salida	: 0.04us
Tiempo de caída del producto	: 0.18us
Características del pulso de velocidad de flujo	: Frecuencia (Hz) = 7.5 * Caudal (L / min)
Pulsos por litro	: 450
Durabilidad	: mínimo 300,000 ciclos
Longitud del cable	: 15cm

Conexiones nominales de tubería	: de 1/2 ", diámetro externo de 0.78", 1/2 "de rosca
Tamaño	: 2.5 "x 1.4" x 1.4 "

Elaboración: propia

3.2.1.2. Características del caudalímetro FS-300^a

Tabla 3.10. Características del Sensor de Caudal FS-300A.

CARACTERÍSTICAS DEL CAUDALIMETRO FS-300A	
Tipo de sensor	: efecto Hall
Mini. Voltaje de trabajo	: DC 4.5V
Max. Corriente de trabajo	: 15mA (DC 5V)
Tensión de trabajo	: 5V ~ 24V
Rango de velocidad de flujo	: 1 ~ 60L / min
Capacidad de carga	: ≤10mA (DC 5V)
Temperatura de funcionamiento	: ≤80 °C
Temperatura del líquido	: ≤120 °C
Humedad de funcionamiento	: 35% ~ 90% HR
Presión del agua	: ≤2.0MPa
Temperatura de almacenamiento	: -25 °C ~ + 80 °C
Humedad de almacenamiento	: 25% ~ 95% RH

Elaboración: propia

En la siguiente figura se muestra el aspecto exterior e interior del caudalímetro.

Figura 3.13. Imagen del caudalímetro



Fuente: (Mercado Libre).

3.2.2. Sensores ultrasónicos

Los sensores de ultrasonidos o sensores ultrasónicos son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias que van desde pocos centímetros hasta varios metros. El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar. Estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración.

Estos sensores trabajan solamente donde tenemos presencia de aire (no pueden trabajar en el vacío, necesitan medio de propagación), y pueden detectar objetos con diferentes formas, diferentes colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo, han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco. (Sensor Ultrasónico, 2015)

Un sensor óptico tiene un transmisor y receptor, mientras que un sensor ultrasónico utiliza un elemento ultrasónico único, tanto para la emisión como la recepción. En un sensor ultrasónico de modelo reflectivo, un solo oscilador emite y recibe las ondas ultrasónicas, alternativamente. Esto permite la miniaturización del cabezal del sensor.

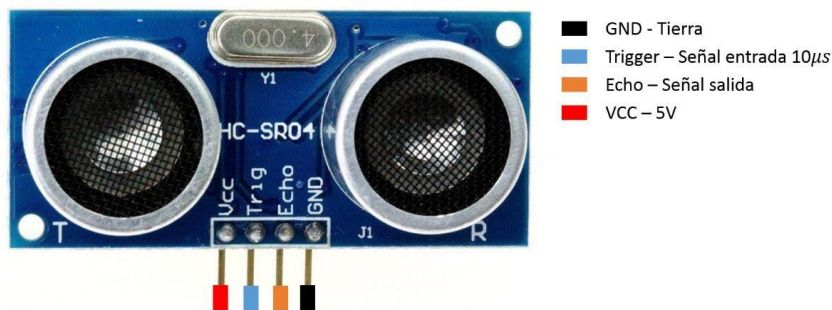
3.2.2.1. Cálculo de la distancia

La distancia se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{Distancia } L = 1/2 \times T \times C$$

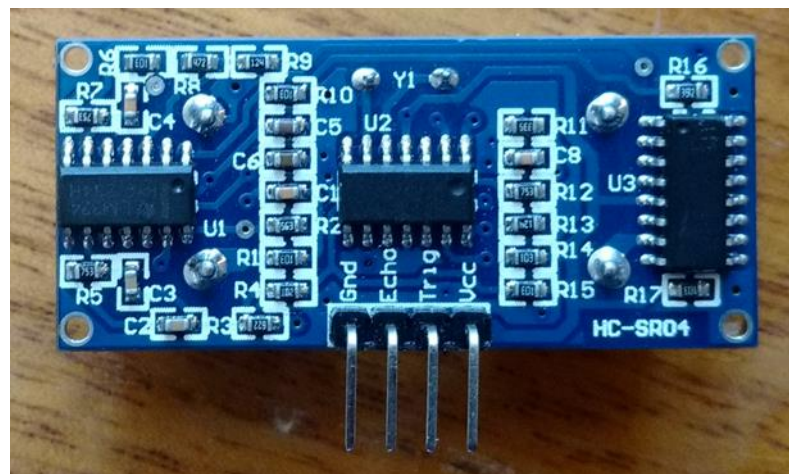
Dónde: L es la distancia, T es el tiempo entre la emisión y la recepción, y C es la velocidad del sonido. (El valor se multiplica por 1/2 ya que T es el tiempo de recorrido de ida y vuelta).

Figura 3.14. Terminales de conexión del sensor ultrasónico.



Elaboración Propia

Figura 3.15. Fotografía de la parte posterior del sensor ultrasónico.



Elaboración: Propia

3.2.2.2. *Características de los sensores ultrasónicos*

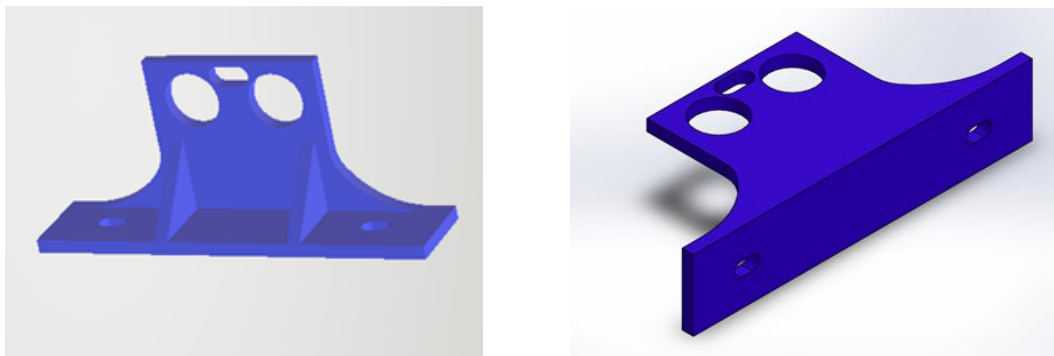
Tabla 3.11. Características del sensor ultrasónico.

CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR ULTRASÓNICO HC-SR04	
Voltaje de Operación:	5V DC
Corriente de reposo:	< 2mA
Corriente de trabajo:	15mA
Rango de medición:	2cm a 450cm
Precisión:	+/- 3mm
Ángulo de apertura:	15°
Frecuencia de ultrasonido:	40KHz
Duración mínima del pulso de disparo TRIG (nivel TTL):	10 μS
Duración del pulso ECO de salida (nivel TTL):	100-25000 μS
Dimensiones:	45mm x 20mm x 15mm
Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra;	20ms (recomendable 50ms)
Voltaje de Operación:	5V DC

Elaboración: propia

Para la sujeción de los sensores ultrasónicos al tanque de almacenamiento como al tanque de suministro se diseñó un soporte en el software SolidWorks el cual se imprimió con una impresora 3D, el diseño realizado es como se muestra a continuación.

Figura 3.16. Soporte del sensor ultrasónico.



Elaboración: Propia

3.3. TRATAMIENTO DE LA SEÑAL

La señal con la cual se está trabajando la programación de la planta debe de estar sin rizados que es lo más recomendable, por lo que se diseñó un filtro para disminuir el rizo presente en los sensores de nivel, consiguiendo que la señal sea lo más real posible.

Así mismo se realizó la conversión de la señal de entrada de los sensores, que es una señal PWM (modulación por ancho de pulso), a una señal analógica Dc el cual si es reconocida por la tarjeta NI myRIO.

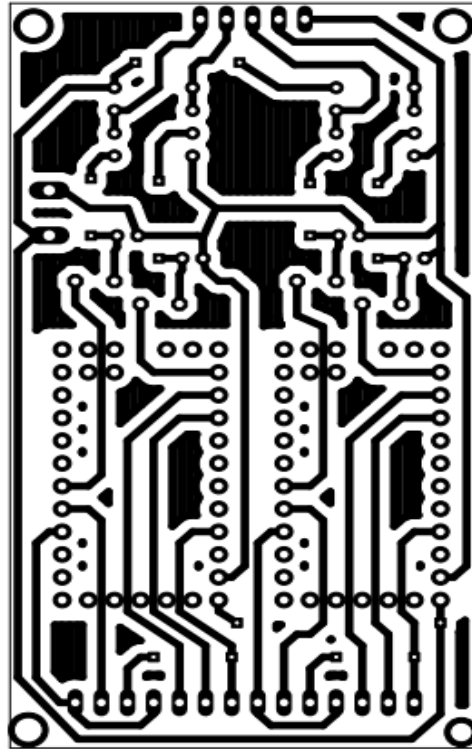
3.3.1. Características de la placa para el tratamiento de señales

La placa se diseñó en el programa Autodesk EAGLE que es un software de automatización de diseño electrónico (EDA). Permite el diseño de placas de circuito impreso (PCB) y su perfecta conexión con los diagramas esquemáticos, ubicación de componentes y enrutamiento de PCB. Este software tiene contenido completo de la biblioteca.

En la siguiente figura se aprecia el diseño realizado en el software Autodesk EAGLE para la impresión en papel buche el cual permite retirar el tóner a la placa de pcb, también

llamada baquelita. Existen de varios tipos: simple capa, doble capa (son caras), fotosensibles, de fibra de vidrio, etc. Nosotros vamos a utilizar una de simple capa, esta es de fenólico.

Figura 3.17. Placa impresa del tratamiento de señales.

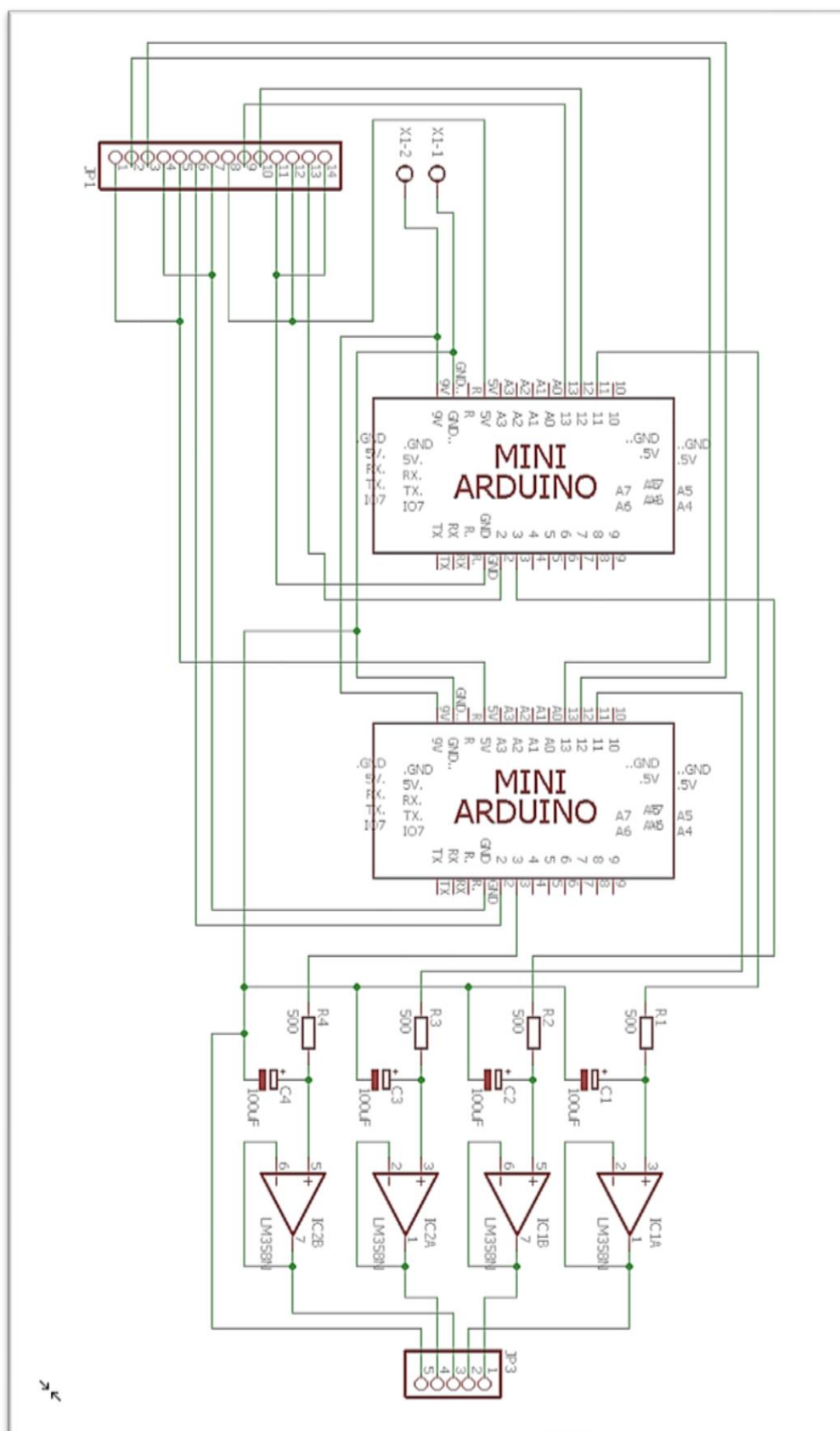


Elaboración: Propia

3.3.2. Esquema de conexión de la placa para el tratamiento de señales

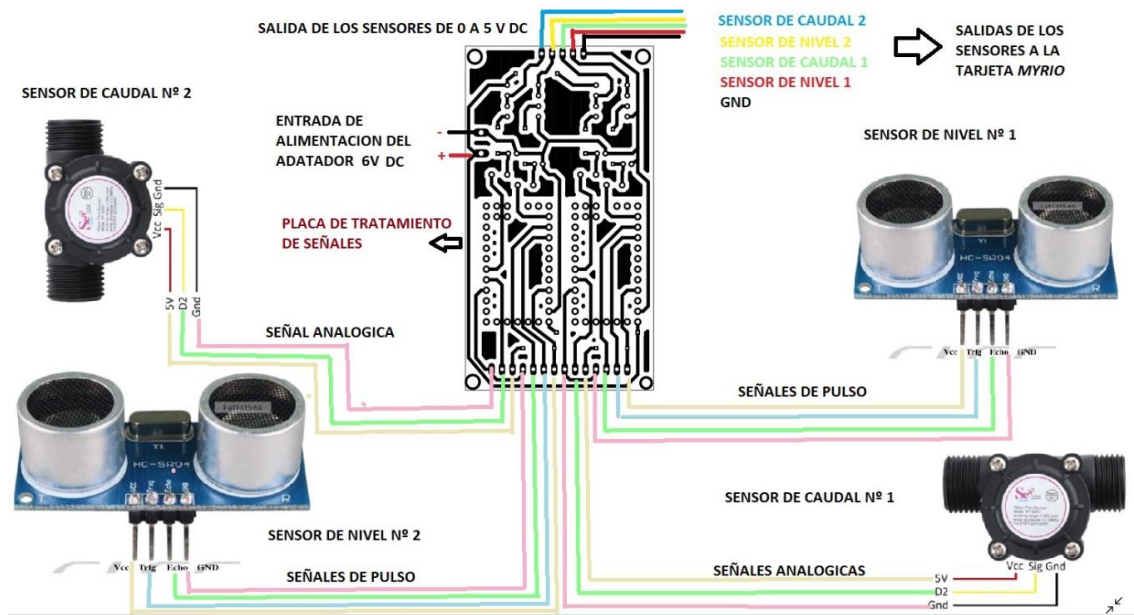
Las señales procedentes de los sensores están conectadas con la placa que se muestra a continuación para poder convertir la señal analógica de entrada (señal cuadrada de frecuencia variable) a una señal de modulación por ancho de pulso mediante la utilización del tablero para microcontroladores Arduino pro Mini y posterior a esta se instaló el filtro pasa banda para convertir la señal de modulación por ancho de pulso (PWM) a una señal analógica de voltaje constante y además con la incorporación del amplificador operacional reducir el ruido presente.

Figura 3.18. Esquema de Conexión de la placa de tratamiento de señales.



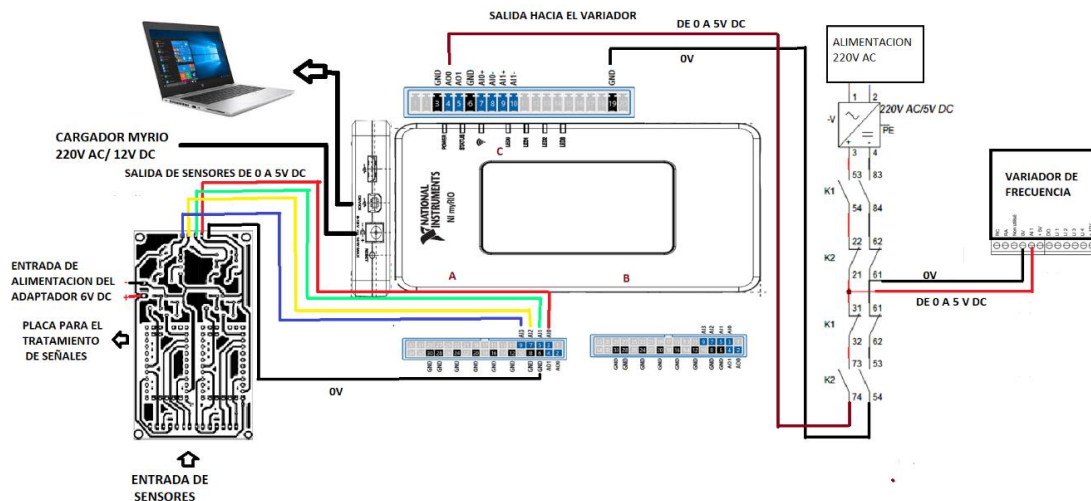
Elaboración: Propia

Figura 3.19. Esquema de Conexión de placa de tratamiento de señales y sensores.



Elaboración: Propia

Figura 3.20. Esquema de Conexión de la placa de tratamiento a la tarjeta NI myRIO.



Elaboración: Propia

Los factores que nos llevaron a elegir el amplificador operacional LM358 para nuestro filtro pasa banda son:

Es un dispositivo habitual en gran cantidad de proyectos.

Resulta fácil encontrar circuitos, diseños y aplicaciones en Internet.

Facilidad para utilizarlo con alimentación simple. No necesitarás utilizar alimentación simétrica (no tendrás que utilizar voltajes negativos).

El rango de voltajes con el que se trabajar se ajusta bien a Arduino.

Se consigue que no se atenúe la frecuencia que nos interesa.

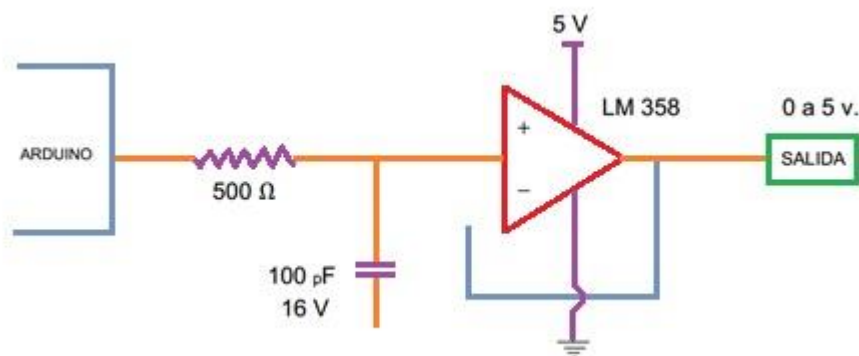
El consumo de este amplificador es reducido.

Por cada chip que compramos tenemos dos LM358.

Es uno de los amplificadores operacionales más baratos que podemos encontrar.

A continuación, se muestra un esquema del filtro pasa banda con el amplificador operacional LM358 y sus respectivos cálculos para la determinación de los valores de las resistencias y de los capacitores.

Figura 3.21. Esquema del filtro pasa banda.



Elaboración: propia

Frecuencia del PWM se muestra en las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5.

$$f_{PWM} = \frac{ChA}{N*256} = \frac{16x10^6 Hz}{N*256} = 62500 Hz \quad (3.1)$$

$$f_{PWM} = 20 * fc \quad (3.2)$$

$$f_c = \frac{f_{pwm}}{20} = \frac{62500}{20} = 3125 \text{ Hz}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (3.3)$$

$$C = 100_p F \quad (3.4)$$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * 3125 * 100 * 10^{-9}} = 509.2958 \Omega \quad (3.5)$$

f_{PWM} : Frecuencia de la modulación por ancho de pulso.

N: frecuencia (60 Hz)

f_c : Frecuencia de corte

C: capacitor de 100 pico faradios.

R: resistencia en ohmios.

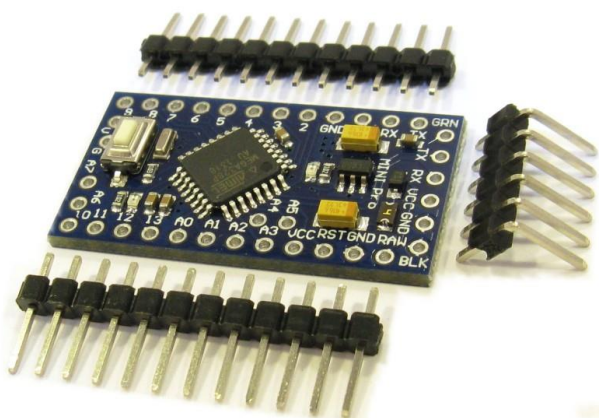
3.3.3. Características del arduino pro mini 328

Se eligió este tablero para microcontroladores porque se instaló en un espacio pequeño y además las configuraciones realizadas son permanentes (no varía la programación durante el funcionamiento de la planta). Viene impulsado por ATmega328 disponible en versiones de 3.3V y 8 MHz, el otro a 5V y 16 MHz.

Tiene 14 pines de entrada / salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador integrado, un botón de restablecimiento y orificios para los cabezales de los pines de montaje.

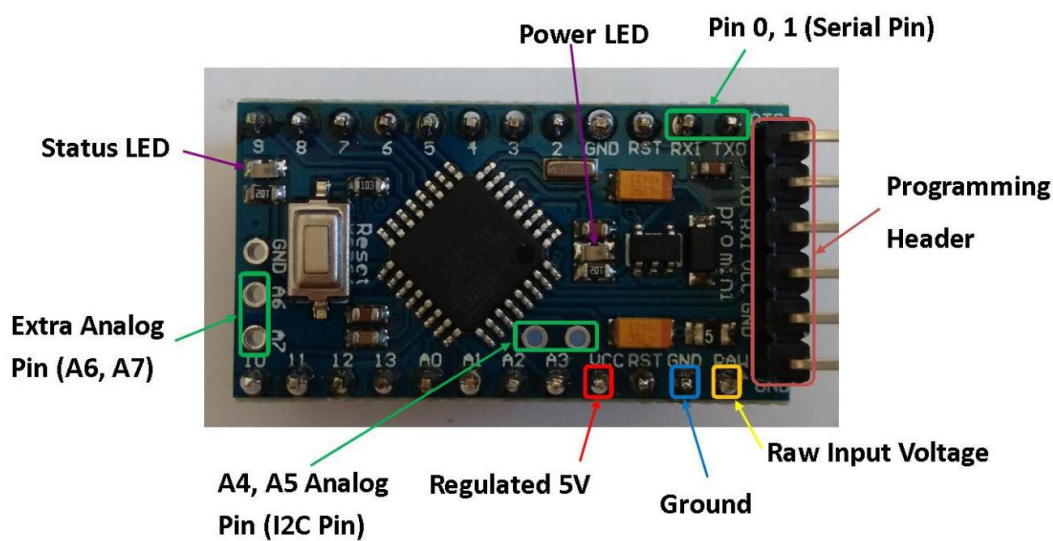
La placa viene sin cabezales premontados, lo que permite el uso de varios tipos de conectores o la soldadura directa de cables. El diseño del pin es compatible con el Arduino Mini.

Figura 3.22. Placa del arduino pro mini.



Elaboración: Propia

Figura 3.23. . Características del arduino pro mini.



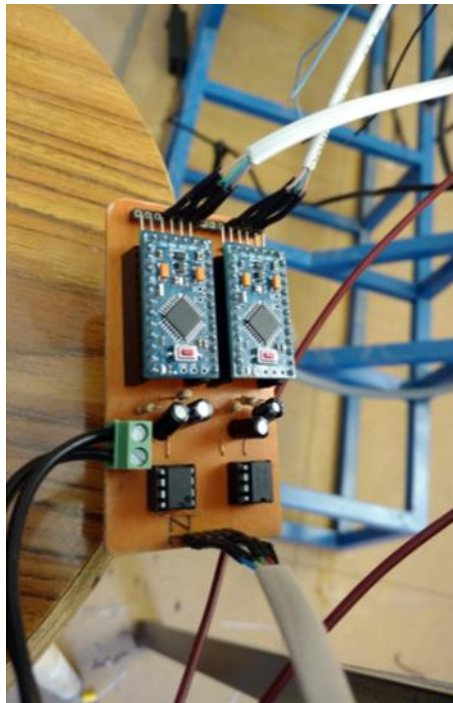
Elaboración: Propia

La programación realizada para los dos sensores de caudal como para la programación de los dos sensores de nivel se muestra en el anexo N°- 01.

3.3.5. Montaje de los componentes en la placa del tratamiento de señales

En la siguiente figura se muestra el montaje realizado de los Arduino pro mini, así como de los amplificadores operacionales en la placa de tratamiento de señales.

Figura 3.25. Montaje de los componentes a la placa de tratamiento de señales.

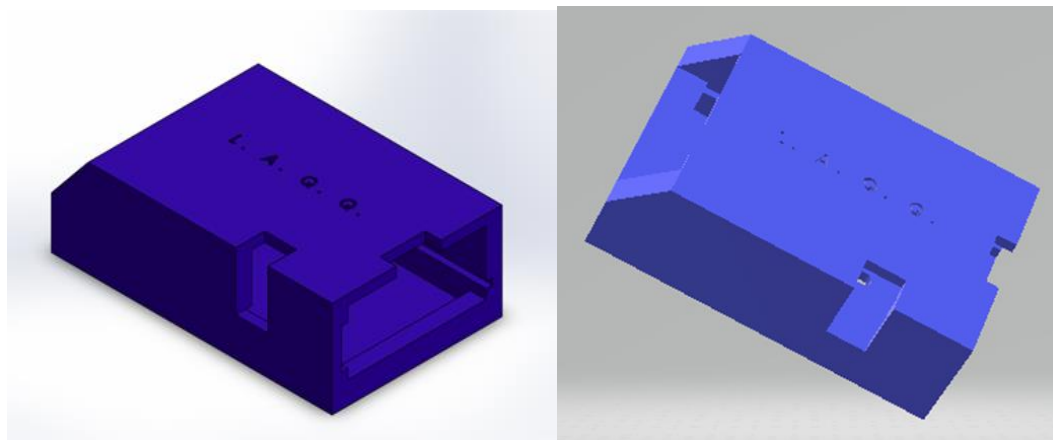


Elaboración: Propia

3.3.6. Carcasa para la placa de tratamiento de señales

Para la carcasa de los componentes de la placa de tratamiento de señales se hizo el diseño en el software SolidWorks el cual posteriormente se imprimió con una impresora 3D, el diseño realizado es como se muestra a continuación.

Figura 3.26. Carcasa de la placa de tratamiento de señales.

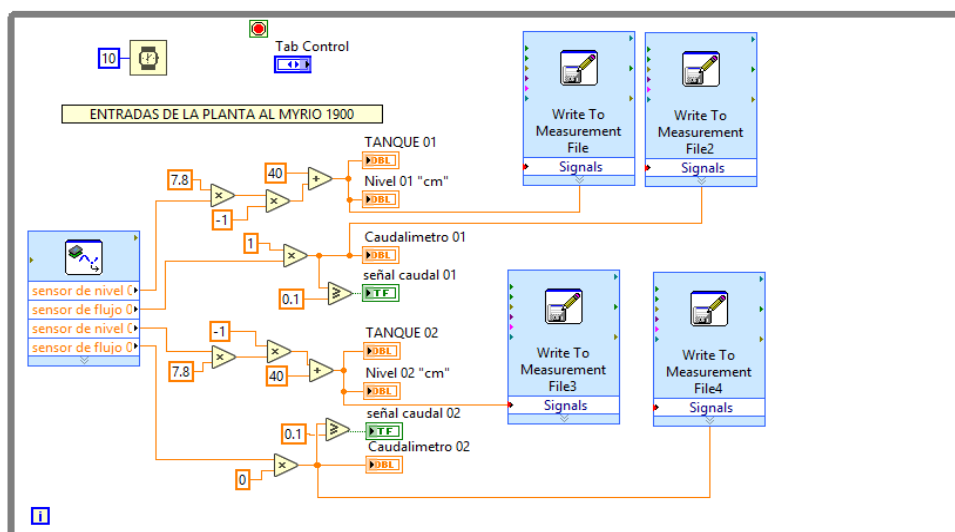


Elaboración: Propia

3.3.7. Adquisición y generación de datos en LabView

El primer paso para el proceso de la identificación es la adquisición y generación de datos de la planta mediante Labview y la tarjeta MYRIO-1900 realizando las conexiones en el sistema que se muestra en la Figura 43 el cual nos sirvió para exportar los datos obtenidos por los sensores en un documento Excel.

Figura 3.27. Diagrama de bloques para la adquisición de datos.



Elaboración: Propia

3.4. GENERACIÓN DE LAS CONSTANTES PARA EL CONTROLADOR PID.

3.4.1. Datos obtenidos de la planta

Tabla 3.12. datos obtenidos de la planta a frecuencia máxima

item	input	ouput	tiempo	item	input	ouput	tiempo
1	5	8.62	0.338	71	5	18.99	59.514
2	5	8.62	1.184	72	5	19.37	60.360
3	5	8.62	2.029	73	5	19.34	61.205
4	5	8.62	2.874	74	5	19.44	62.051
5	5	8.62	3.720	75	5	19.58	62.896
6	5	8.62	4.565	76	5	19.75	63.741
7	5	8.78	5.410	77	5	19.94	64.587
8	5	8.80	6.256	78	5	20.28	65.432
9	5	8.87	7.101	79	5	20.26	66.277
10	5	9.00	7.947	80	5	20.62	67.123
11	5	8.99	8.792	81	5	20.53	67.968
12	5	9.12	9.637	82	5	20.53	68.814
13	5	9.38	10.483	83	5	20.69	69.659
14	5	9.50	11.328	84	5	20.82	70.504
15	5	9.58	12.173	85	5	20.99	71.350
16	5	9.97	13.019	86	5	21.54	72.195
17	5	10.18	13.864	87	5	21.73	73.040
18	5	10.21	14.710	88	5	21.86	73.886

19	5	10.26	15.555	89	5	21.99	74.731
20	5	10.48	16.400	90	5	21.83	75.577
21	5	10.81	17.246	91	5	22.27	76.422
22	5	11.05	18.091	92	5	22.36	77.267
23	5	11.33	18.936	93	5	22.53	78.113
24	5	11.42	19.782	94	5	22.65	78.958
25	5	11.53	20.627	95	5	22.79	79.803
26	5	11.63	21.473	96	5	22.99	80.649
27	5	11.21	22.318	97	5	23.11	81.494
28	5	11.59	23.163	98	5	23.28	82.340
29	5	11.85	24.009	99	5	23.40	83.185
30	5	12.37	24.854	100	5	23.56	84.030
31	5	12.54	25.699	101	5	23.61	84.876
32	5	12.65	26.545	102	5	23.72	85.721
33	5	12.55	27.390	103	5	23.86	86.566
34	5	12.91	28.236	104	5	24.06	87.412
35	5	12.94	29.081	105	5	24.18	88.257
36	5	13.28	29.926	106	5	24.34	89.103
37	5	13.25	30.772	107	5	24.52	89.948
38	5	13.74	31.617	108	5	24.65	90.793
39	5	13.91	32.462	109	5	24.78	91.639
40	5	14.10	33.308	110	5	24.80	92.484
41	5	14.26	34.153	111	5	24.72	93.329
42	5	14.38	34.999	112	5	25.06	94.175
43	5	14.48	35.844	113	5	25.22	95.020
44	5	14.38	36.689	114	5	25.04	95.866
45	5	14.81	37.535	115	5	25.50	96.711
46	5	15.00	38.380	116	5	25.68	97.556
47	5	15.18	39.225	117	5	25.76	98.402
48	5	15.31	40.071	118	5	25.99	99.247
49	5	15.42	40.916	119	5	26.01	100.092
50	5	15.28	41.762	120	5	25.78	100.938
51	5	15.70	42.607	121	5	25.90	101.783
52	5	15.66	43.452	122	5	26.41	102.629
53	5	16.05	44.298	123	5	26.22	103.474
54	5	16.22	45.143	124	5	26.36	104.319
55	5	16.15	45.988	125	5	26.73	105.165
56	5	16.51	46.834	126	5	26.65	106.010
57	5	16.71	47.679	127	5	26.68	106.855
58	5	16.85	48.525	128	5	27.17	107.701
59	5	16.96	49.370	129	5	26.96	108.546
60	5	16.93	50.215	130	5	26.73	109.392
61	5	17.27	51.061	131	5	27.18	110.237
62	5	17.42	51.906	132	5	27.23	111.082
63	5	17.36	52.751	133	5	27.15	111.928
64	5	17.47	53.597	134	5	27.52	112.773

65	5	17.59	54.442	135	5	27.68	113.618
66	5	17.81	55.288	136	5	27.45	114.464
67	5	18.29	56.133	137	5	27.56	115.309
68	5	18.17	56.978	138	5	28.07	116.155
69	5	18.61	57.824	139	5	27.51	117.000
70	5	18.73	58.669				

Elaboración: propia

3.4.2. Cálculo de los parámetros del controlador PID

Se conoce la ecuación 2.14:

$$G(x) = \frac{K}{TS+1} e^{-LS} \quad (2.14)$$

Por lo tanto, lo que faltaría calcular es k, T y L.

3.4.2.1. Cálculo de la ganancia “K”:

De la siguiente ecuación se obtiene la siguiente expresión, como también se conoce que las variables a controlar son el nivel y la tensión suministrada al variador se utiliza la ecuación 2.15:

$$K = \frac{\text{variable de salida}}{\text{variable de entrada}} = \frac{\Delta D}{\Delta V} \quad (2.15)$$

Entonces:

$$K = \frac{\Delta D}{\Delta V} = \frac{D_f - D_i}{V_f - V_i}$$

$$K = \frac{D_f - D_i}{V_f - V_i} = \frac{27.5 - 8.62}{5 - 0}$$

$$K = 3.776$$

En sistemas de control el valor de “K” se considera adimensional, por lo tanto, k es un constante de ganancia.

3.4.2.2. *Calculo de la constante de tiempo “T”:*

De la ecuación 2.16 se podrá obtener la constante de tiempo y de los datos adquiridos, se obtiene:

$$T = \frac{\Delta t}{4} \quad (2.16)$$

$$T = \frac{\Delta t}{4} = \frac{t_f - t_i}{4}$$

$$T = \frac{t_f - t_i}{4} = \frac{117 - 5}{4}$$

$$\tau = T = 28 \text{ s.}$$

3.4.2.3. *Calculo de tiempo de retardo “L”:*

El tiempo de retardo es el tiempo en que demora en responder el sistema, según los datos obtenidos del laboratorio se deduce que:

$$L = 5 \text{ s.}$$

Entonces la función de transferencia es:

$$G(x) = \frac{3.776}{28S + 1} e^{-5s}$$

Calculo de “ K_p ”

De la tabla se tiene:

$$K_p = \frac{1.2T}{KL}$$

$$K_p = \frac{1.2(28)}{(3.776)(5)}$$

$$K_p = 44.49$$

Calculo de “ T_i ”

De la tabla se tiene:

$$T_i = 2L$$

$$T_i = 2 * 5$$

$$T_i = 10$$

Calculo de “ T_d ”

De la tabla se tiene:

$$T_d = 0.5L$$

$$T_d = 0.5 * 5$$

$$T_d = 2.5$$

Obteniendo los parámetros del PID

$$P = K_p = 44.49$$

$$I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{44.49}{10} = 4.449$$

$$D = (K_p)(T_d) = (44.49)(2.5) = 111.225$$

Por lo tanto, se obtiene:

$$P = 44.49$$

$$I = 4.449$$

$$D = 111.225$$

3.4.3. Parámetros del control PID con software Matlab

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a dar el formato correspondiente a la hoja Excel para que lo reconozca adecuadamente el Matlab.

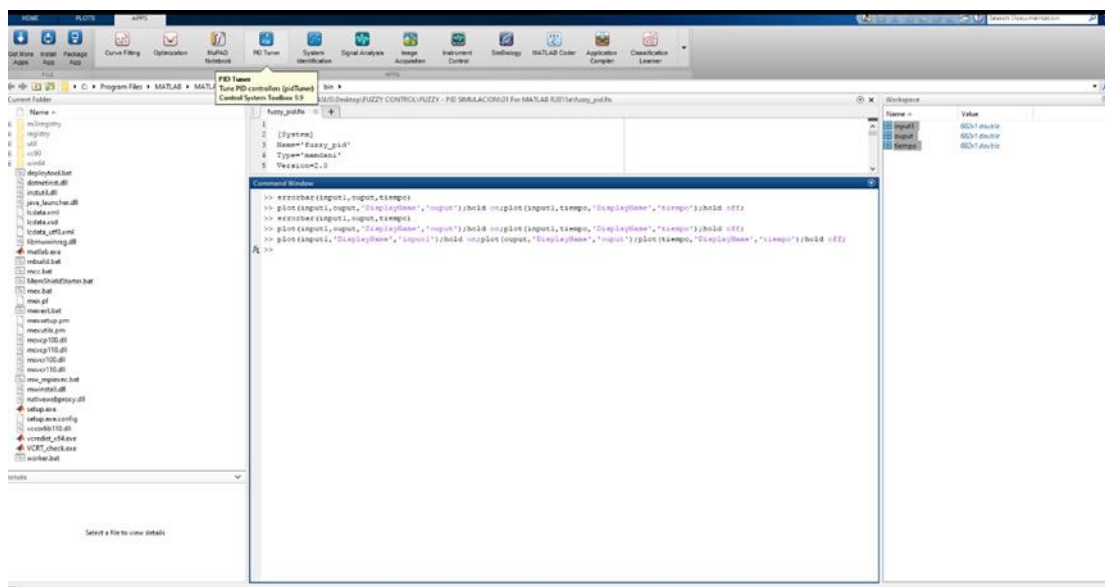
Figura 3.28. Datos reconocidos por Matlab.

tiempo	input	output
0	0	9.1800
1	0	9.1800
2	0	9.0269
3	0	8.9600
4	0	8.8830
5	0	8.8207
6	0	8.7315
7	0	8.5791
8	0	8.4744
9	0	8.4263
10	0	8.3792
11	0	8.3362
12	0	8.4839
13	0	8.5029
14	0	8.5228
15	0	8.5699
16	5	8.6172
17	5	8.7029
18	5	8.7791

Elaboración: Propia

Ingresando a PID tuner como se muestra en la siguiente figura.

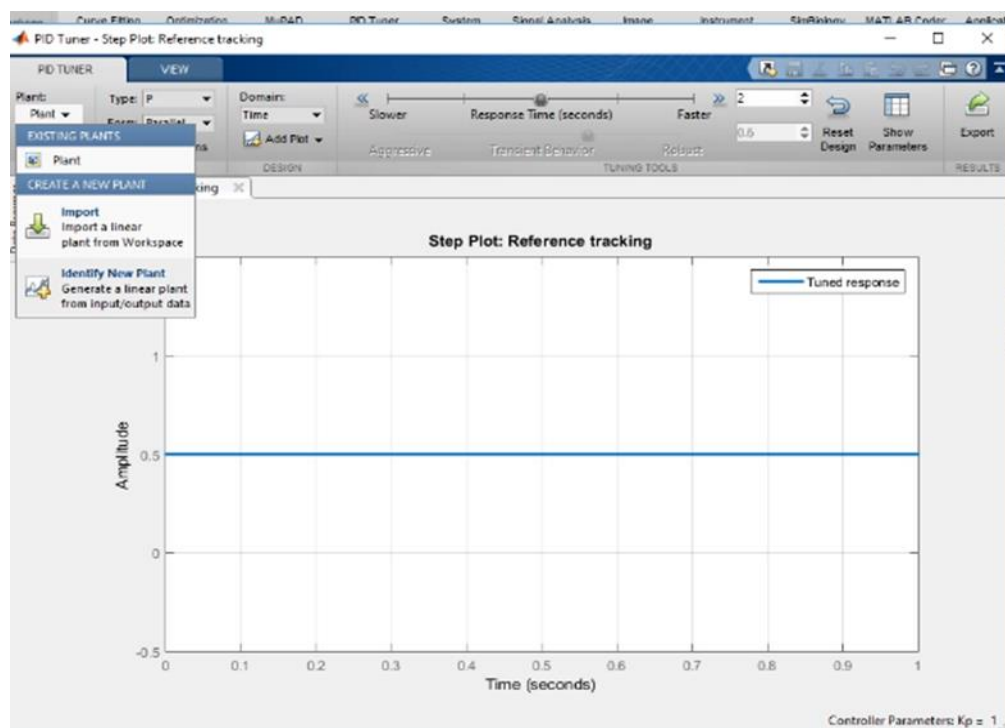
Figura 3.29. Selección del menú PID Tuner.



Elaboración: Propia

Luego dentro del PID tuner seleccionamos Identify New Plant tal como se muestra en la siguiente figura.

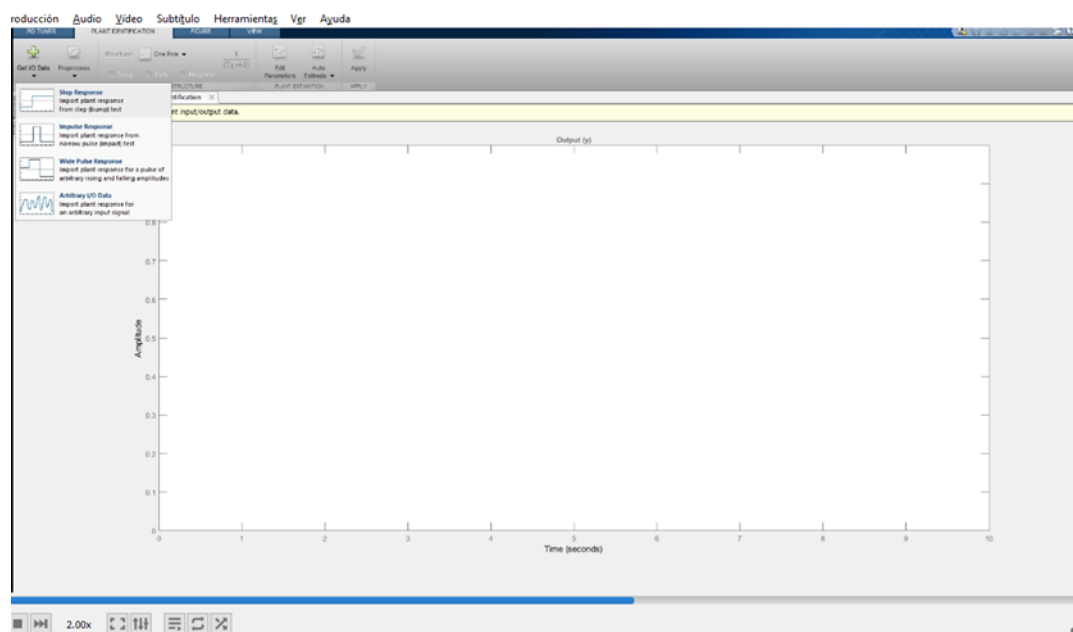
Figura 3.30. Creación de una función de transferencia para la planta.



Elaboración: Propia

En base a nuestra entrada que es un escalón se procede a hacer clic en el menú “Get I/O Data” y seleccionamos “Step response” como se aprecia en la siguiente figura.

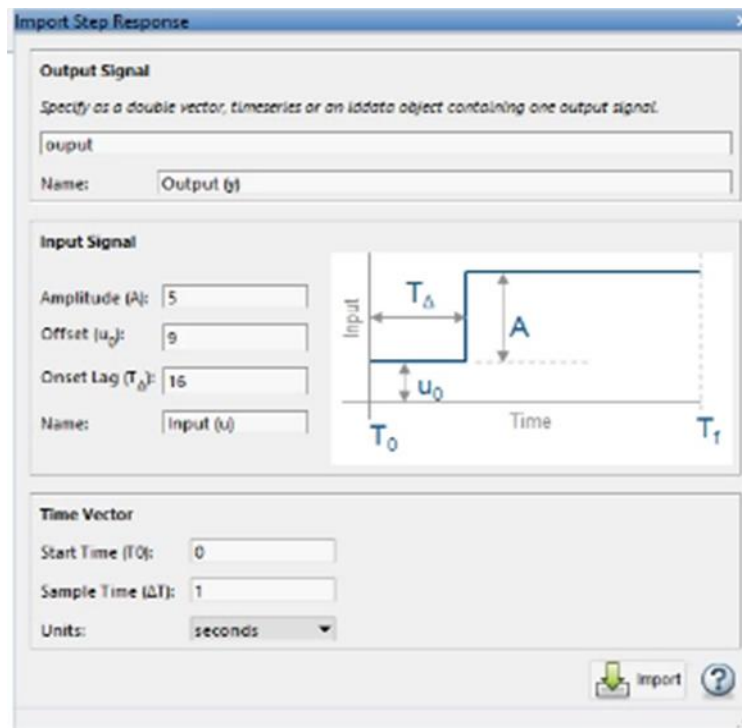
Figura 3.31. Selección del sub menú step response.



Elaboración: Propia

La configuración de la salida se hace en base a nuestros datos como estamos trabajando con un variador de velocidad la salida varia de 0 a 5 voltios por lo que en la amplitud colocamos 5, luego verificamos en que tiempo se activa la señal de salida y configuramos el offset. Como se aprecia en la siguiente figura.

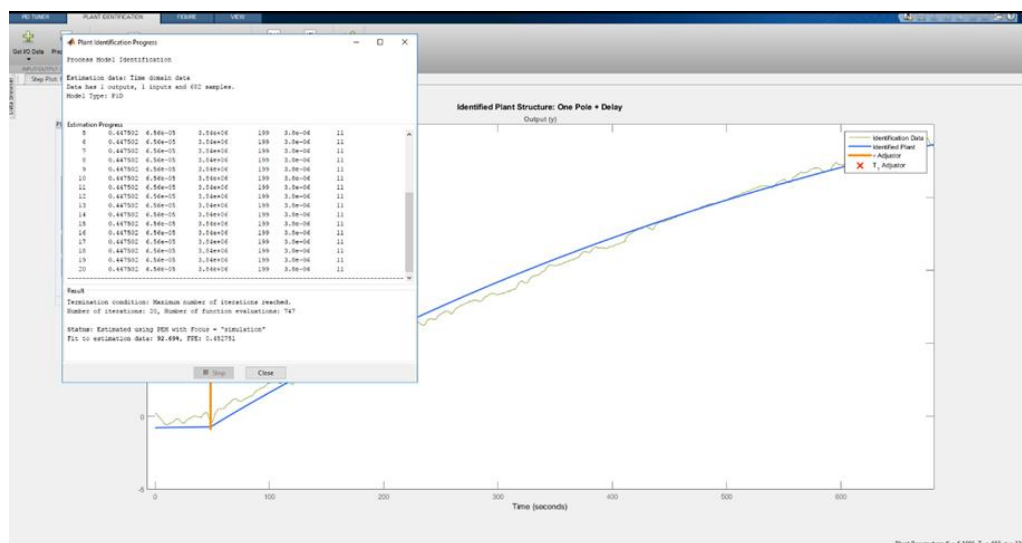
Figura 3.32. Configuración del Step Response.



Elaboración: Propia

A continuación, se aprecia que dentro del menú “Plant Identification” tenemos la opción de “Auto estimate” para auto sintonizar la planta.

Figura 3.33. Auto sintonización de la planta.



Elaboración: Propia

Se tiene un grado de confiabilidad de 92.69 por ciento y se obtiene los siguientes parámetros de nuestra planta para poder insertarlos dentro de nuestro control PID en el software Labview.

Figura 3.34. Parámetros obtenidos mediante la auto sintonización.



Elaboración: Propia

3.5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PID, PID- DIFUSO

3.5.1. Consideraciones generales

Tenemos una planta de control de niveles de agua, está compuesta por dos tanques uno de suministro que es el que alimenta de agua a la bomba y el otro será el tanque principal al cual se pretende controlar el nivel. También se dispone de una válvula que regula el caudal de salida de nuestra planta y que en nuestro caso representa la perturbación, se dispone de una bomba que está conectada a un variador de velocidad para regular el caudal de entrada al tanque principal, para obtener la altura de llenado deseada del depósito en nuestro caso llamado set-point.

En el presente proyecto se diseñó un control para un depósito industrial de agua que mantenga lo más constante posible su nivel, independientemente de la cantidad de líquido que se extraiga o, dicho más exactamente, del caudal de salida.

Para controlar el proceso disponemos de un sistema SCADA que muestran en tiempo real como se está comportando la planta.

También se disponen de gráficas que permiten visualizar como es el comportamiento de nuestro sistema.

El caudal de entrada de los tanques está regulado por el variador de velocidad, que a su vez son accionadas por un control tipo PID o PID - difuso.

Para el funcionamiento del sistema de control se consideró la selección de los componentes del prototipo, sistemas de protección principal y el diseño de la estructura PID o PID - difuso en el software de simulación LAB- VIEW.

3.5.2. Software LabView

LabVIEW es un software suministrado por la empresa National Instruments orientado a la programación de instrumentos virtuales en un entorno gráfico que utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto.

Puede utilizarse para registrar, analizar resultados, automatización y control de procesos, realizar medidas y control de alta velocidad y con muchos canales.

3.5.2.1. Instrumento Virtual (VI)

Los programas en LABVIEW son llamados instrumentos virtuales.

Cada VI tiene tres partes principales que son:

- Panel frontal.
- Diagrama de bloques.

➤ Icono/conector.

Un instrumento virtual se puede calificar como un módulo de software que representa el funcionamiento de un instrumento físico. Para acceder a los datos externos del instrumento es necesario un hardware el cual estará conectado al computador. Este hardware podría ser una tarjeta de adquisición de datos, un FPGA, una tarjeta DSP, o un instrumento controlado mediante GPIB (Global Purpose Interface Bus), mediante RS - 232 o mediante el bus XVI. De esta manera el usuario del instrumento virtual puede visualizar en la pantalla de un computador los datos recibidos por el instrumento en tiempo real. Al mismo tiempo puede examinar con un programa realizado por el mismo LabVIEW. Se puede controlar el sistema por medio del mismo hardware mediante el programador de LABVIEW de acuerdo a la conclusión que se llegue del análisis de los datos.

3.5.2.2. *Entorno gráfico*

LabVIEW utiliza íconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. Por lo que los cables que conectan los nodos (elementos de codificación) y VIs en el diagrama de bloque determinan el orden de ejecución de código.

Cuando hablamos de un entorno gráfico nos referimos tanto a una representación del panel frontal del instrumento virtual como de la programación en sí. Para visualizar los datos del instrumento se utilizan una serie de objetos como puede ser leds, botones, pantallas y demás tipos de controles o visualizadores. Los indicadores son tantos como controladores existen de diversos tipos, a los cuales se les pueden cambiar la interfaz, el tamaño, escala y la sensibilidad.

La programación grafica de cifras (constantes, datos introducidos por el panel de control o datos obtenidos por el hardware), como de operaciones se realizan mediante

iconos o bloques las cuales se colocan en el diagrama de bloques y se conectan entre sí mediante cables virtuales.

La Programación gráfica se consigue gracias a unos iconos o bloques que representan tanto cifras como operaciones. Estas cifras pueden ser constantes, datos introducidos por el panel de control, o datos capturados por el hardware del ordenador. En cuanto al tipo de operaciones que se pueden realizar son las típicas de cualquier lenguaje de programación más unas cuantas propias del LabVIEW. Todos estos bloques se colocan en el diagrama de bloques y se conectan entre sí mediante un cable virtual.

3.5.3. Tarjeta NI myRIO

La tarjeta de NI myRIO es una herramienta de desarrollo reconfigurable y reutilizable el cual contiene un procesador programable dual-core ARM Cortex-A9 de 667 MHz y un FPGA también contiene el chip Zynq-7010, todo un sistema programable que permite liberar toda la capacidad de un sistema de LabVIEW.

La tarjeta MYRIO utiliza herramientas de tiempo real, FPGA y capacidades integradas de Wi-Fi, junto con la memoria integrada; las cuales permiten ejecutar aplicaciones de forma remota y ejecutarlos sin la necesidad de la conexión a un computador.

Posee tres conectores (dos puertos NI myRIO expansión [MXP] y un puerto de NI miniSystems [MSP] que es idéntico al conector NI myDAQ) envían y reciben señales desde los sensores y circuitos. Cuarenta líneas de E / S digitales, con el apoyo de SPI, PWM, entrada de codificador de cuadratura, UART e I2C; ocho entradas analógicas de una sola terminal; dos entradas analógicas diferenciales; cuatro salidas analógicas unipolares; y dos salidas analógicas con referencia a tierra permiten la conectividad a un sinnúmero de sensores y dispositivos y control de programación de sistemas. Toda esta funcionalidad está construida y pre configurada en la funcionalidad FPGA por defecto.

3.5.3.1. *Requerimientos*

3.5.3.1.1. *Software*

- NI LabVIEW 2016 o versiones superiores.
- NI LabVIEW myRIO Toolkit 2016
- NI LabVIEW Real-Time 2016
- Xilinx Compilation Tools 14.4

3.5.3.1.2. *Hardware*

- Tarjeta NI myRIO
- Fuente de alimentación para NI myRIO
- Cable USB para NI myRIO

Figura 3.35. Fotografía de la tarjeta NI-myRIO.



Elaboración: Propia

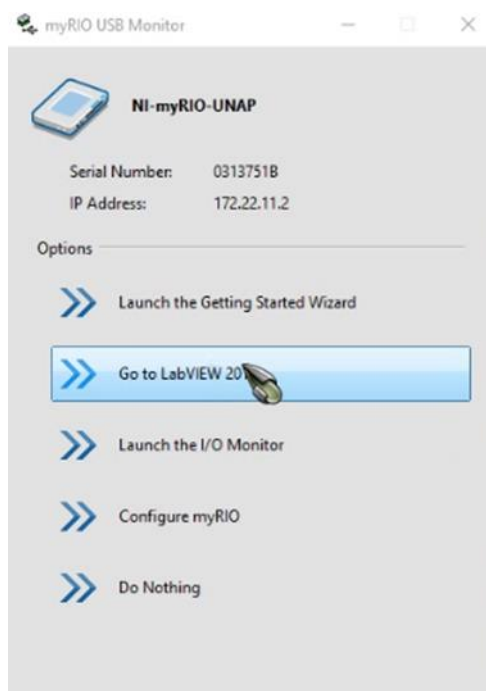
3.5.3.2. Conectando el NI myRIO

Asegúrese de encender el dispositivo NI myRIO utilizando el adaptador de corriente que viene incluido. Conectamos el extremo USB tipo B del cable USB en el dispositivo NI myRIO. Conectamos el otro extremo del cable al puerto USB de su ordenador.

Sin iniciar LabVIEW o NI MAX, si el dispositivo está encendido, el sistema operativo debe reconocer el dispositivo NI myRIO e instalar y configurar los controladores respectivos.

En nuestro caso es un sistema operativo Windows el cual inicia automáticamente el monitor USB NI myRIO como se aprecia a continuación.

Figura 3.36. NI myRIO USB Monitor.



Elaboración: Propia

Teniendo el nombre del dispositivo el cual modificamos a NI-myRIO-UNAP, número serial y la dirección IP, se dispone de cinco opciones a optar cuando se detecta un dispositivo myRIO.

3.5.3.2.1. Abriendo el WIZARD

Con el Wizard, podemos monitorizar el estado del funcionamiento del dispositivo myRIO conectado; nos permite renombrar el dispositivo; y muestra una ventana similar a un panel frontal que se puede utilizar para observar la funcionalidad del acelerómetro, para apagar y prender los leds que trae integrados y para hacer pruebas con el botón definido por el usuario.

La pantalla final del wizard presenta dos opciones:

Start my first project now: Seleccionando esta opción, se abre un tutorial.

Go straight to LabVIEW: Seleccionando esta opción, se abre la ventana de inicio de LabVIEW.

3.5.3.2.2. Go to labview

Seleccionando esta opción, se abre la ventana de inicio de LabVIEW.

3.5.3.2.3. Launch the i/o monitor

Muestra una ventana similar a un panel frontal que se puede utilizar para observar la funcionalidad del acelerómetro, para apagar y prender los leds que trae integrados y para hacer pruebas con el botón definido por el usuario.

3.5.3.2.4. Configure NI myRIO

Seleccionando esta opción se abre el navegador de configuración de myRIO.

3.5.3.2.5. Do nothing

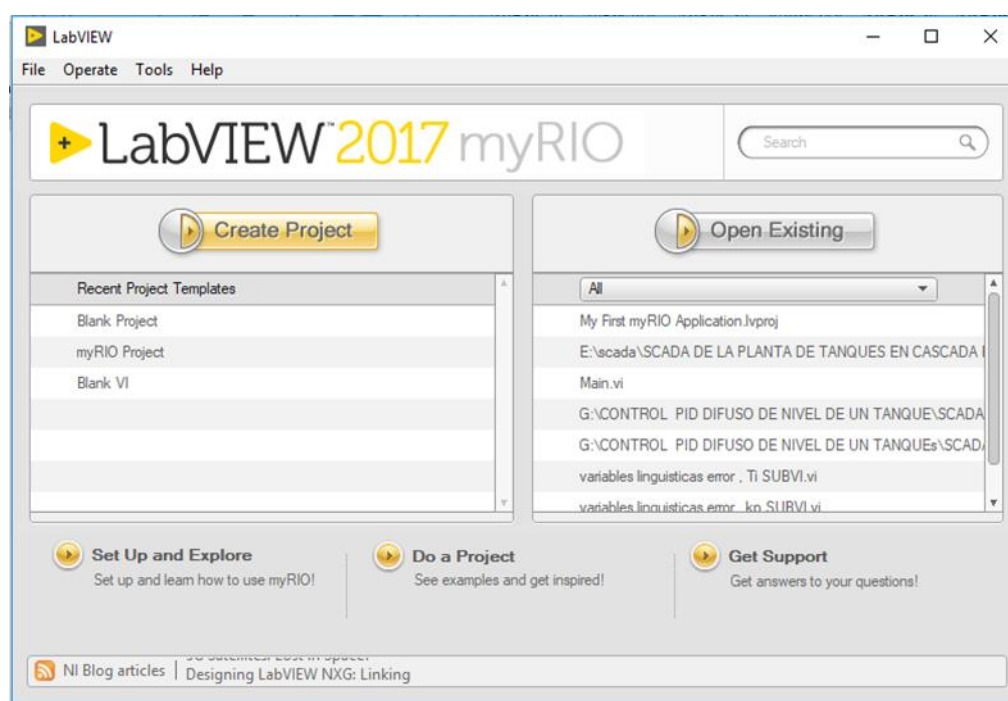
Si LabVIEW ya se encuentra abierto y un proyecto es configurado para myRIO, Ud. puede utilizar esta opción para cerrar el Monitor USB cuando una unidad es reconectada a la computadora de desarrollo.

3.5.4. Creando un proyecto de LabVIEW

Un proyecto de LabVIEW es necesario para desplegar código a dispositivos embebidos, tales como NI myRIO. También permite organizar las aplicaciones cuando estas se convierten en complejas.

Para crear un nuevo proyecto ingresamos al programa LabVIEW y hacemos clic en “Create Project” tal como se muestra en la figura a continuación.

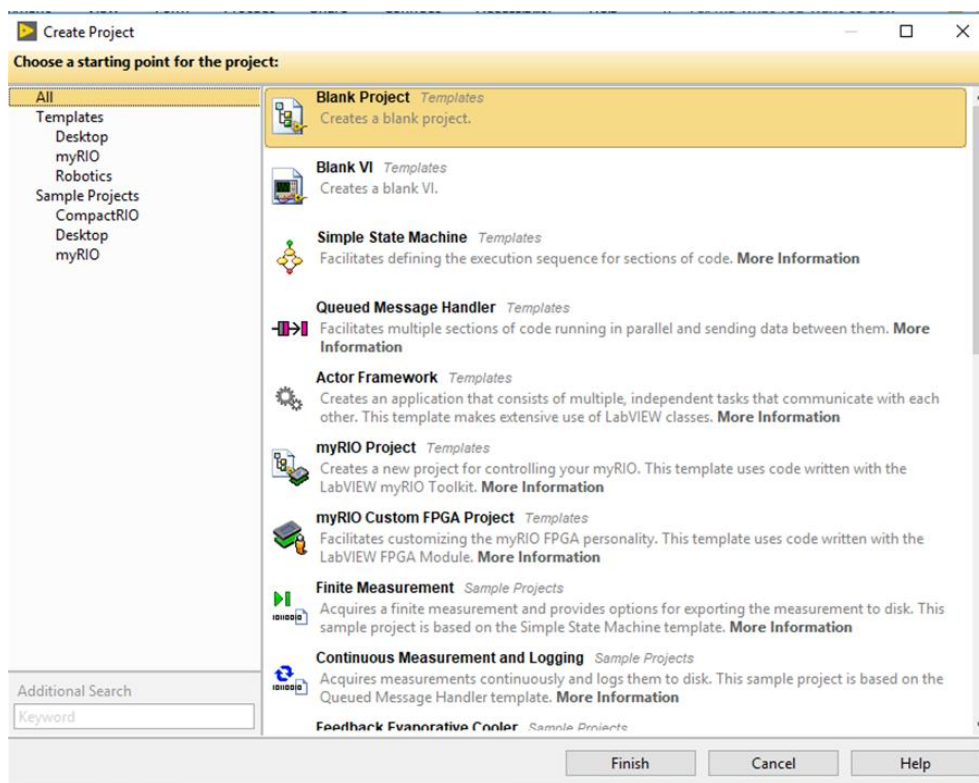
Figura 3.37. Inicio del programa Labview.



Elaboración: Propia

Seleccionamos “All” y luego doble clic en “Blank Project” como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 3.38. Ventana para seleccionar los proyectos.

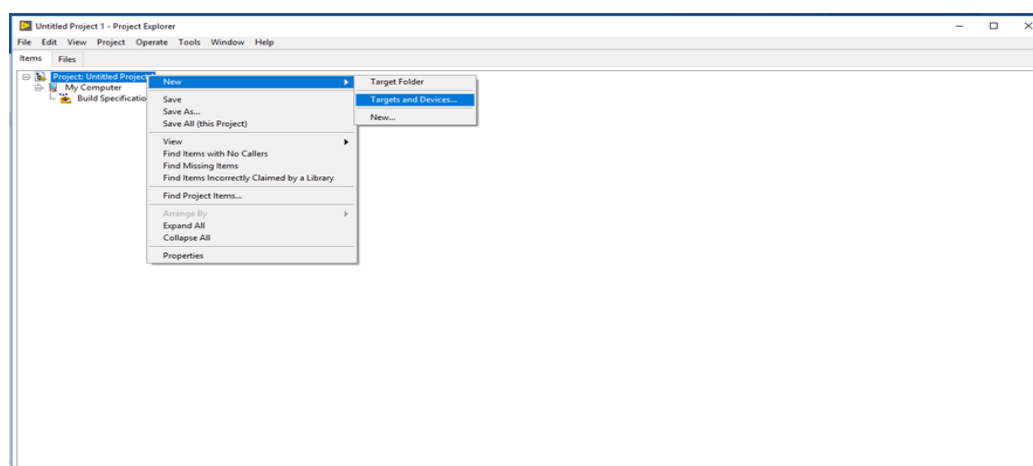


Elaboración: Propia

Para programar en LabVIEW debemos crear un VI nuevo.

Para crear un VI dentro de nuestra tarjeta myRIO hacemos clic derecho en “Project: Untitled Project” y seleccionamos New» Targets and Devices como se muestra en la siguiente figura.

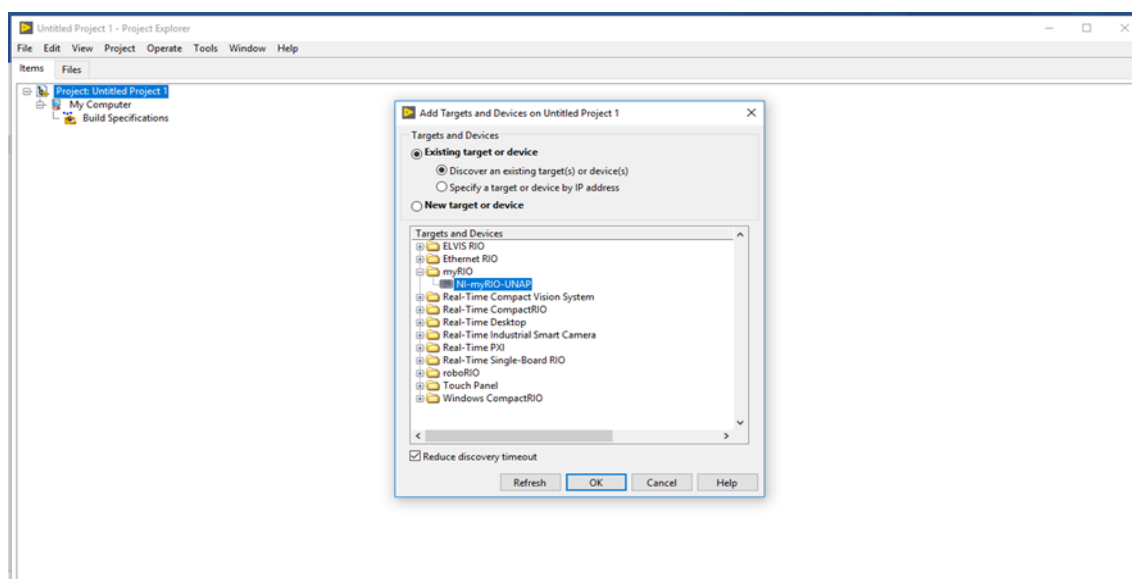
Figura 3.39. Ventana para seleccionar los dispositivos.



Elaboración: Propia

Se abre una ventana en la cual ubicamos el nombre de nuestro dispositivo “myRIO” hacemos clic en el símbolo de “+” y seleccionamos nuestra tarjeta que en este caso es NI-myRIO-UNAP y hacemos clic en “OK” como se aprecia en la siguiente figura.

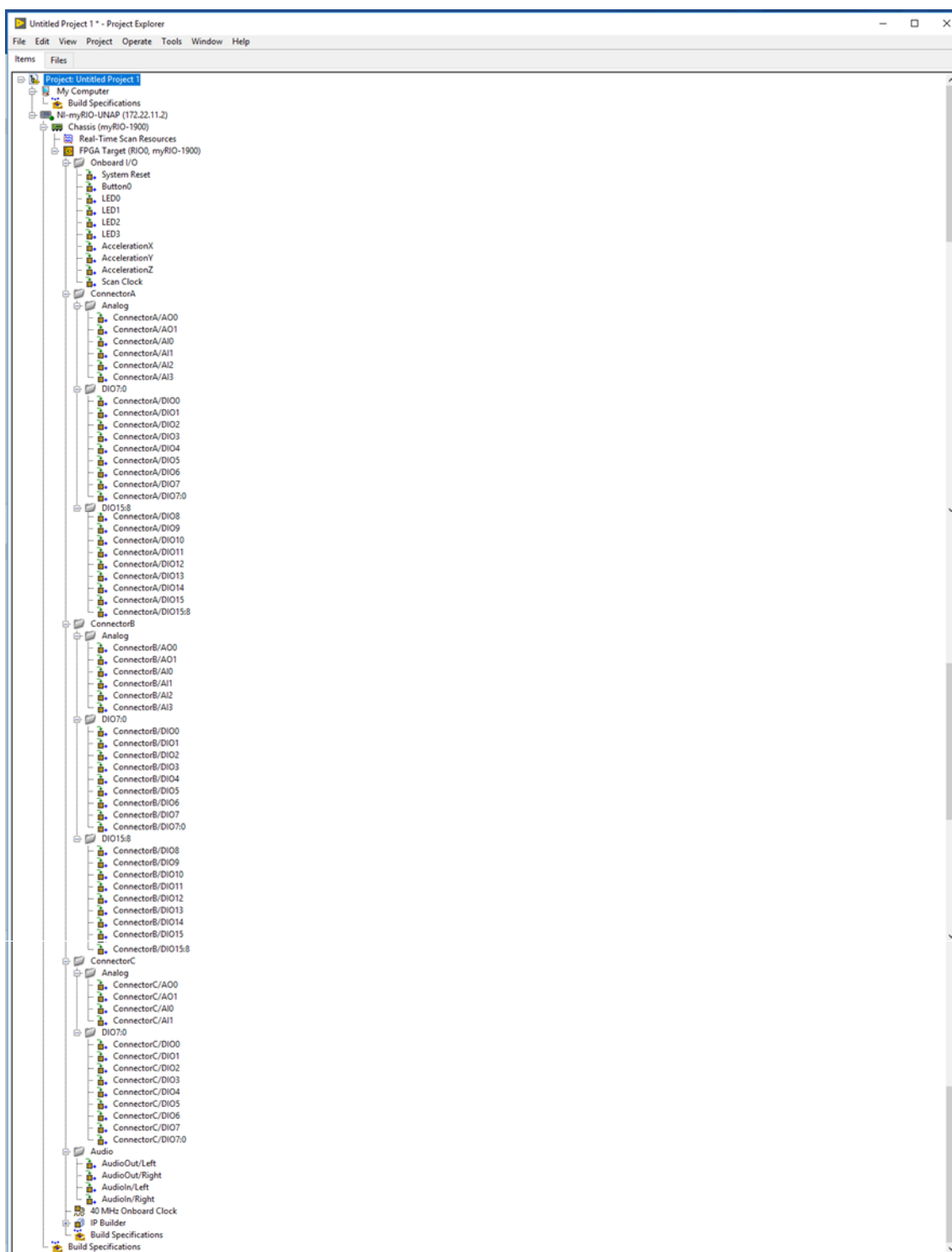
Figura 3.40. Selección del dispositivo a utilizar.



Elaboración: Propia

Se muestra la siguiente pantalla.

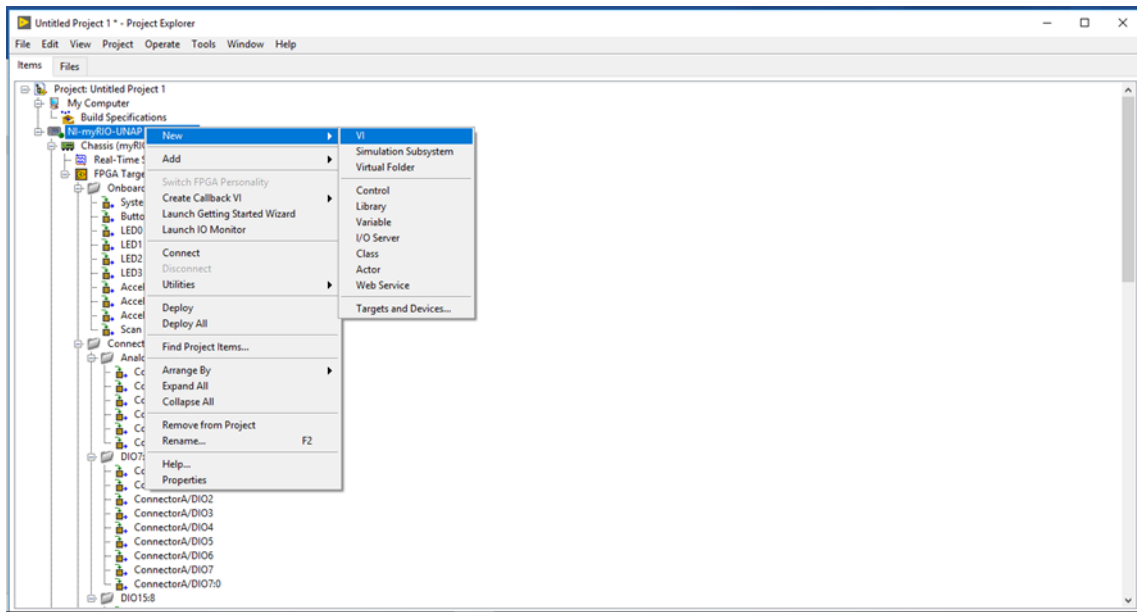
Figura 3.41. Entradas y salidas de la tarjeta NI-myRIO.



Elaboración: Propia

Ubicamos “NI-myRIO-UNAP” y le hacemos clic derecho en “NI-myRIO-UNAP (172.22.11.2)” y seleccionamos New» VI en el Explorador de Proyectos de LabVIEW.

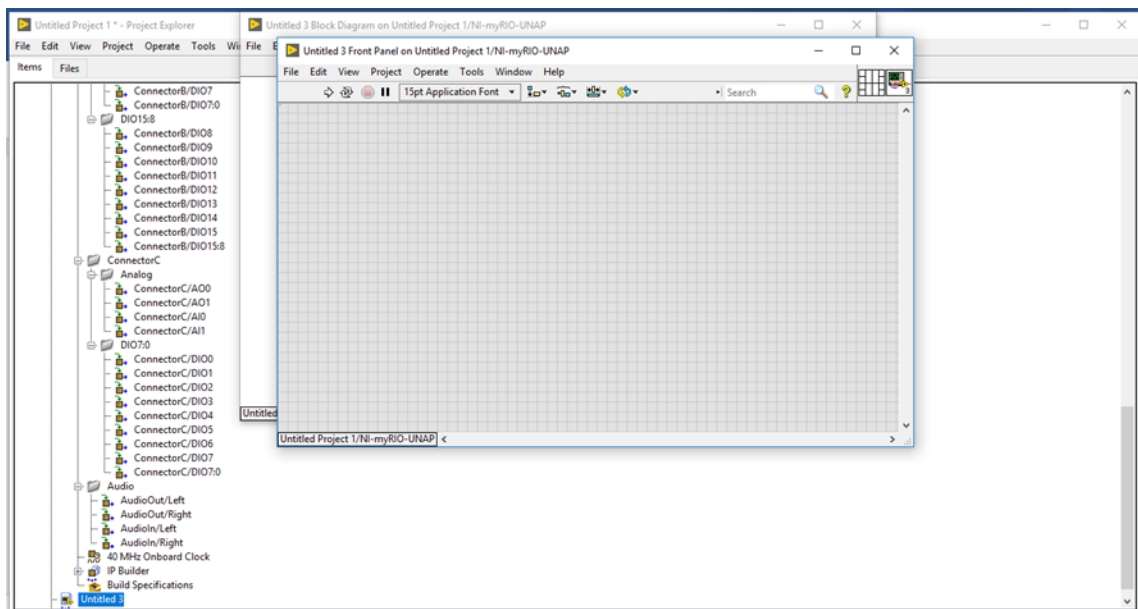
Figura 3.42. Ventana para seleccionar el VI dentro de myRIO.



Elaboración: Propia

El cual está conformado por dos ventanas, el Panel Frontal y el Diagrama de Bloques.

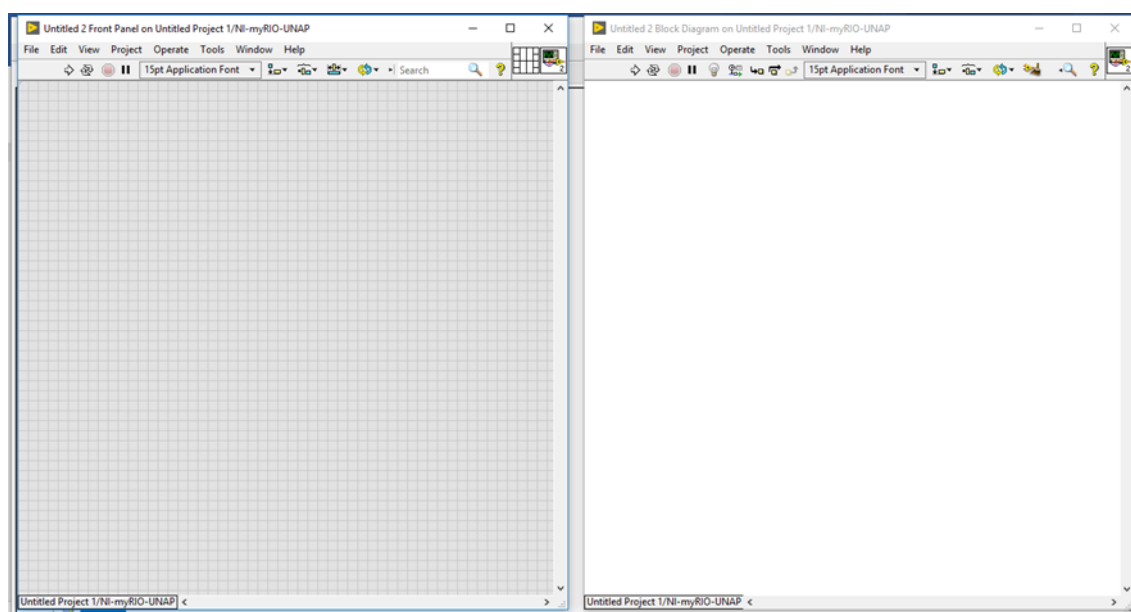
Figura 3.43. Inicialización del nuevo VI dentro de myRIO.



Elaboración: Propia

Presionando al mismo tiempo las teclas “Ctrl T” se reconfigura la pantalla de la siguiente manera.

Figura 3.44. Reconfiguración de las ventanas del VI.

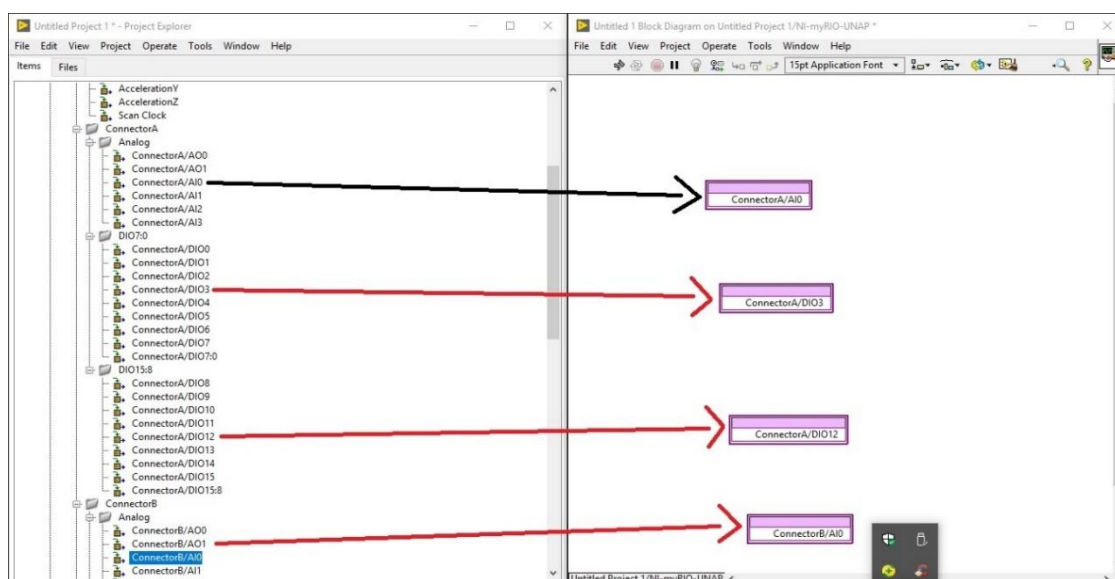


Elaboración: Propia

Para alternar entre una pantalla y la otra se presiona “Ctrl E”

Gracias a Scan Mode, usted puede acceder a las entradas del algoritmo de control, simplemente arrastrando y colocando los canales requeridos en el diagrama de bloques.

Figura 3.45. Selección de las entradas físicas dentro del VI.



Elaboración: Propia

Se muestra la programación de entradas de los sensores de la planta al myRIO 1900 y su respectiva corrección de parámetros para la correcta visualización en el scada ya que la señal que nos manda el myRIO varía de 0 a 5 voltios y nosotros tenemos que transformarlos con operaciones aritméticas a los valores reales a los cuales está representando.

3.5.4.1.1. Para el sensor de nivel 01 y 02

Como nuestra señal de entrada varía de 0 a 5 tenemos que multiplicarle por un factor de 7.8 ya que nuestro sensor se ubica a una distancia de 39 cm del fondo del tanque y además como el sensor da esa señal de manera inversa, es decir cuando la distancia entre el agua y el sensor es cero nos dará una señal de 0 y cuando no haya agua en el tanque nos dará una señal de 5; por lo que tenemos que multiplicarle por un valor de -1 y finalmente agregarle un sumador con una constante de 40 para obtener el nivel real del tanque.

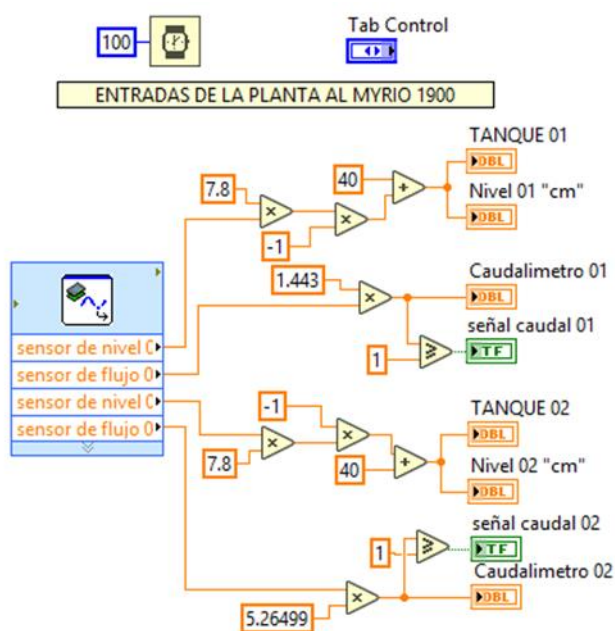
3.5.4.1.2. Para el sensor de caudal 01

Como nuestra señal de entrada varía de 0 a 5 tenemos que multiplicarle por un factor de 1.443 para obtener un valor de caudal muy próximo al real.

3.5.4.1.3. Para el sensor de caudal 02

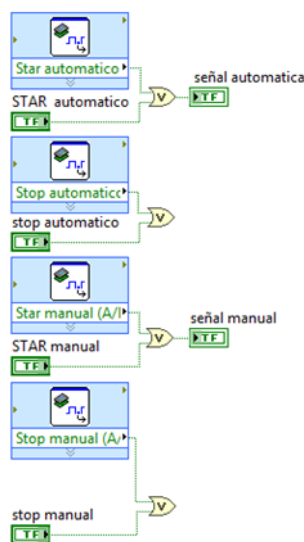
Como nuestra señal de entrada varía de 0 a 5 tenemos que multiplicarle por un factor de 5.26499 para obtener un valor de caudal muy próximo al real.

Figura 3.46. Señal de entrada de los sensores y su respectiva conversión.



Elaboración: Propia

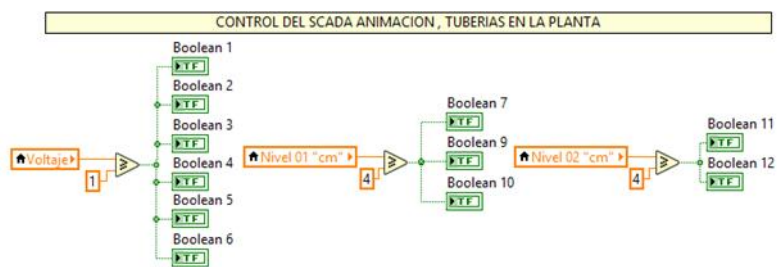
Figura 3.47. Control de inicio y parada del controlador.



Elaboración: Propia

En la siguiente figura se muestra la programación para la animación del SCADA, tuberías y animación de las mismas en la planta.

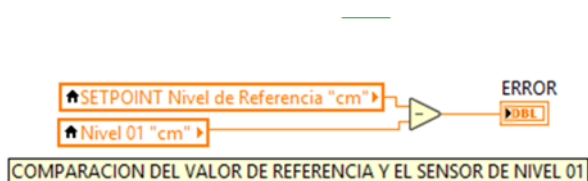
Figura 3.48. Animación del Scada.



Elaboración: Propia

A continuación, se muestra la programación para la visualización del error.

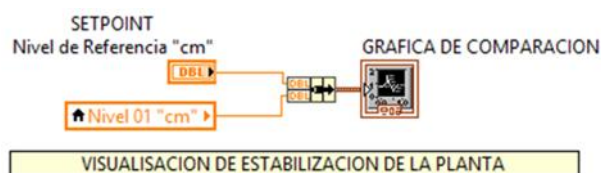
Figura 3.49. Calculo del error.



Elaboración: Propia

En la siguiente figura se muestra la programación realizada para visualizar la gráfica del sistema de control de nivel de agua frente al set-point.

Figura 3.50. Grafica del sistema de control.



Elaboración: Propia

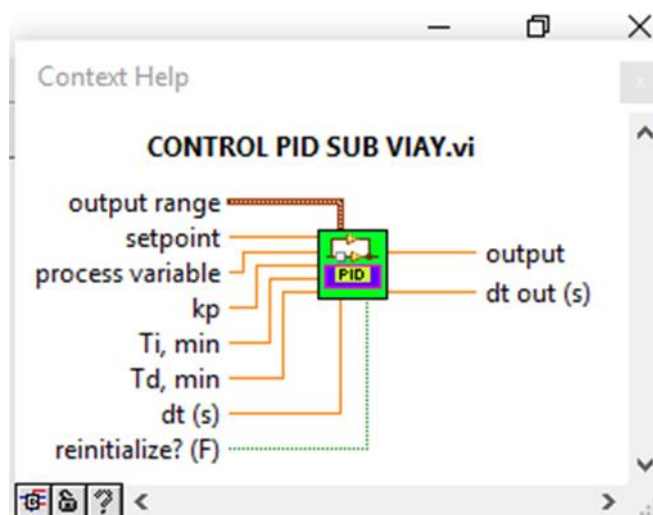
condicionada por los parámetros de sus acciones proporcional, integral y derivativa, así como del tipo de PID empleado.

En el software LabVIEW, dentro de la barra de funciones podemos encontrar a estos dispositivos. Escogiéndose uno de los representados de acuerdo con las características de la aplicación.

3.5.5.2. *PID Sub VIAY.VI*

Los VIs pueden llamar a otros VIs (conocidos como subVIs) y a su vez, cada uno de esos subVIs puede contener más Vis.

Figura 3.52. Conexión del PID SUB VIAY.VI



Elaboración: Propia

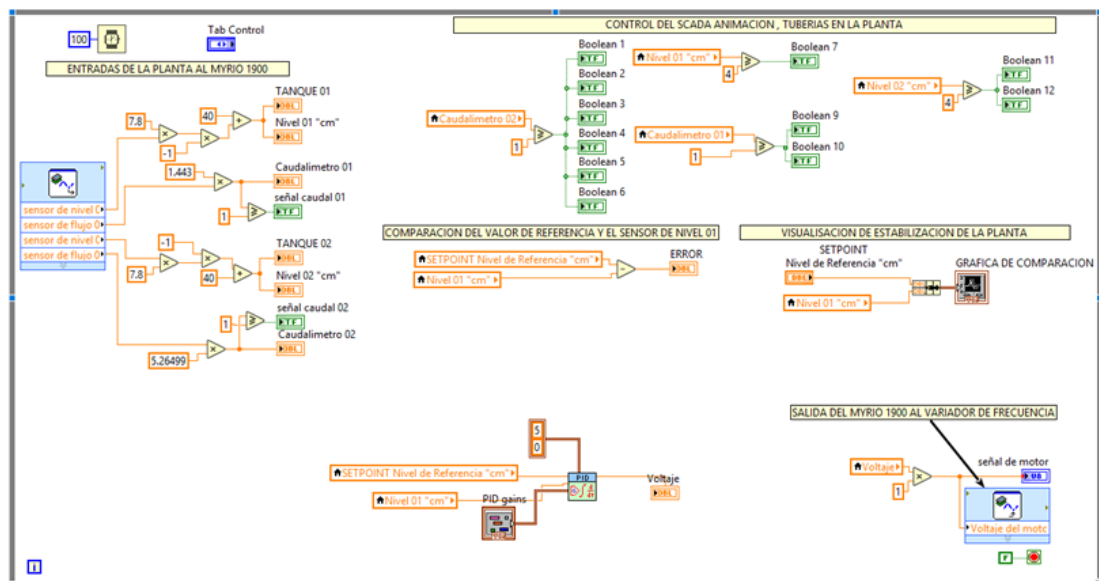
3.5.5.3. *Scada del controlador PID*

Figura 3.53. Scada del controlador PID.



Elaboración: Propia

Figura 3.54. Diagrama de bloques del controlador PID.

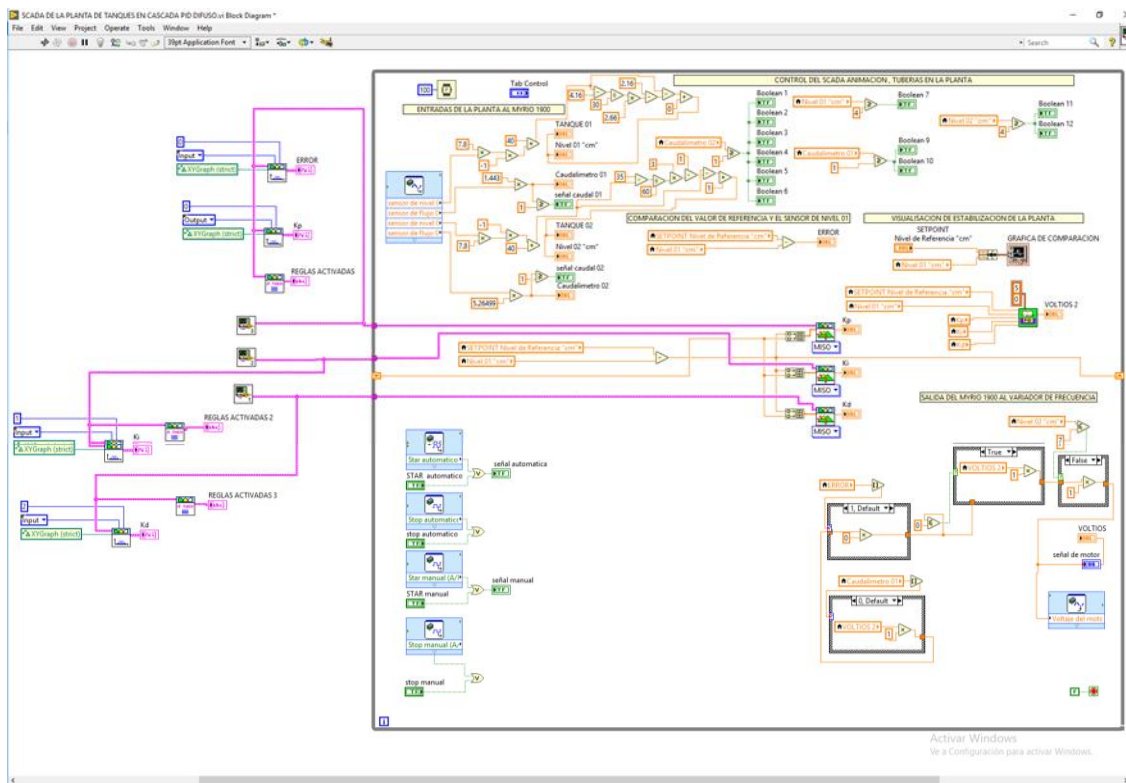


Elaboración: Propia

3.5.6. Desarrollo de software del controlador PID – Difuso en LabView

En la figura que se muestra a continuación se visualiza la programación realizada para el control de la planta con un controlador del tipo PID-fuzzy.

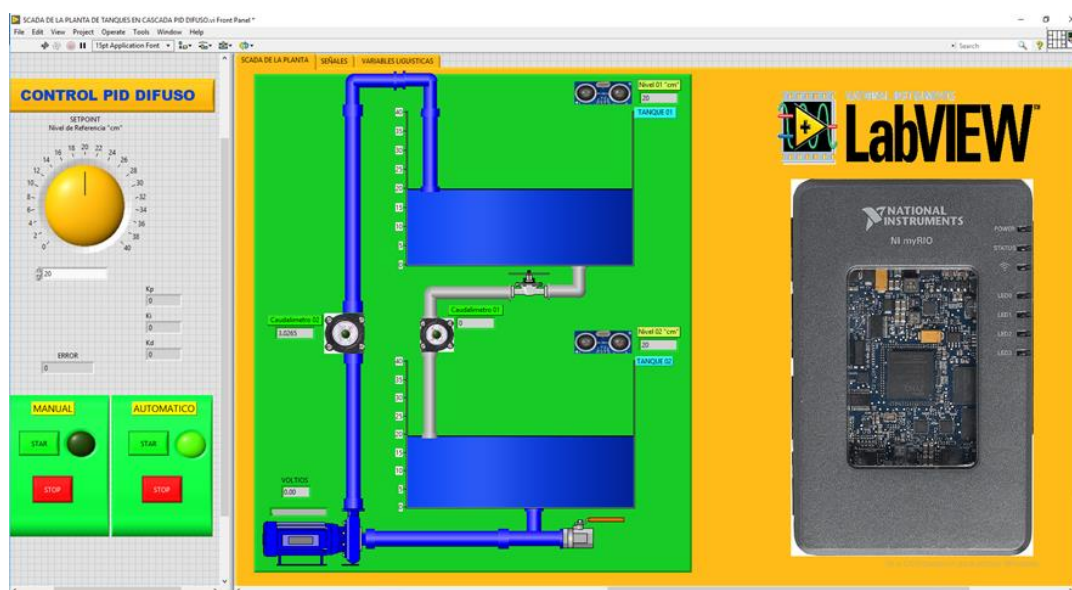
Figura 3.55. Diagrama de bloques del controlador PID - difuso.



Elaboración: Propia

Se aprecia la interfaz de scada que se realizó en el programa labview, el cual muestra el comportamiento real de la planta de una forma gráfica.

Figura 3.56. Scada del Controlador PID – Difuso

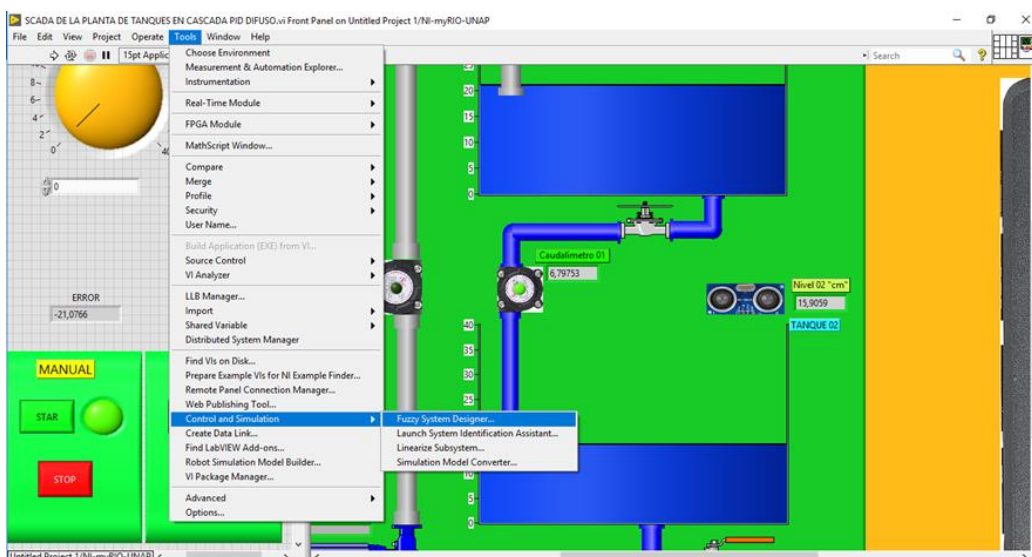


Elaboración: Propia

3.5.6.1. Reglas del sistema difuso para la selección de los valores del PID

El diseño de las reglas de control se realizó mediante prueba y error en base a una serie de pruebas, las cuales se introdujeron en el Fuzzy System Designer al cual se le puede acceder en la barra de menús en el menú “Tools” y seleccionamos “Control and Simulation” y finalmente hacemos clic en “Fuzzy System Designer”.

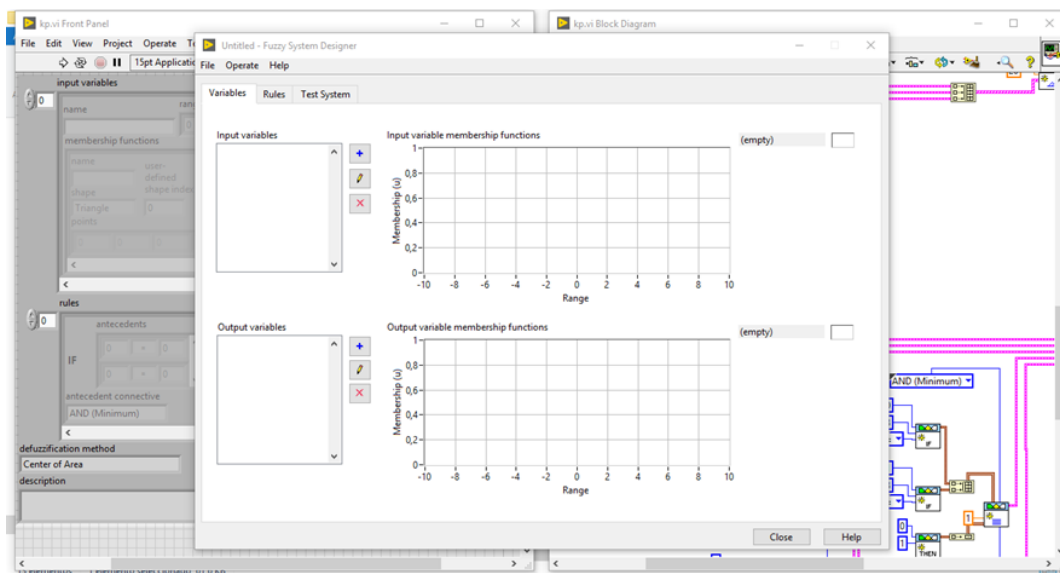
Figura 3.57. Fuzzy System Designer



Elaboración: Propia

Con esta herramienta se puede diseñar de manera interactiva las reglas del controlador PID – difuso. Tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3.58. Herramienta Fuzzy System Designer



Elaboración: Propia

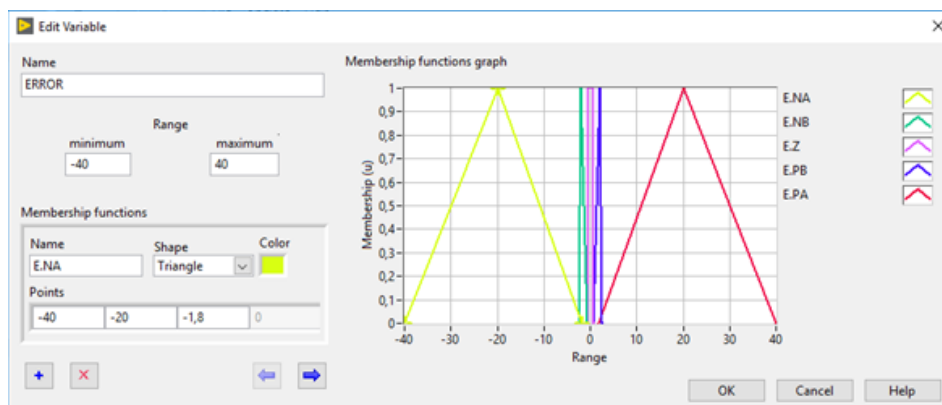
En el Fuzzy System Designer se diseñan las reglas que modifican los parámetros del controlador PID, esto de acuerdo a el diseñador quien establece los parámetros máximos y mínimos dentro de los cuales puede variar cada de una de las constantes del controlador PID como son: la ganancia proporcional, constante de tiempo integral y constante de tiempo derivativa.

También se establece el valor mínimo y máximo para la variable del proceso y consigna.

Por ejemplo, para la variable de entrada “ERROR” se tiene:

- 1) Para el E.NA (error negativo alto) se tiene una función de membresía cerrada triangular no simétrica el cual está representada por el color amarillo, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (-40; -1,8) y un valor intermedio de -20.

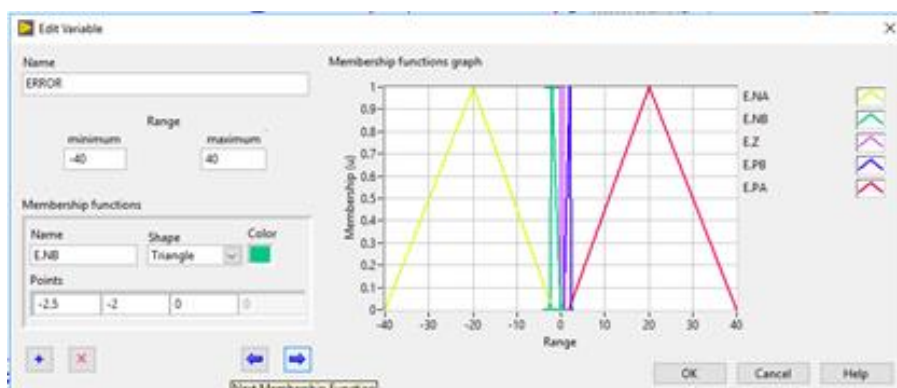
Figura 3.59. Función de membresía para el E.NA (error negativo alto).



Elaboración: Propia

- 2) Para el E.NB (error negativo bajo) se tiene una función de membresía cerrada triangular no simétrica el cual está representada por el color verde, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (-2,5; 0) y un valor intermedio de -2.

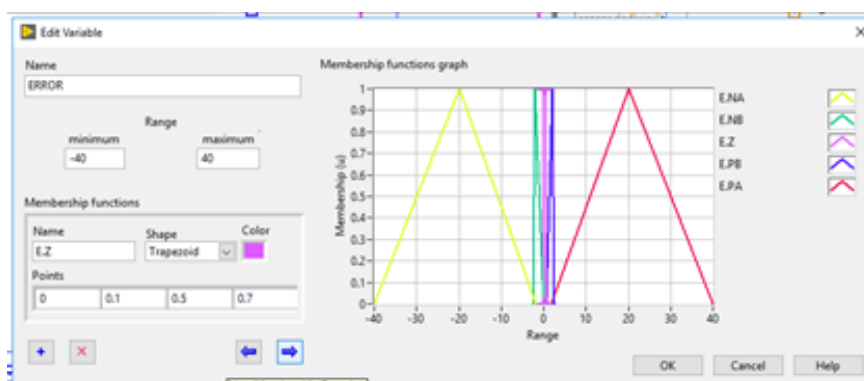
Figura 3.60. Función de membresía para el E.NB (error negativo bajo).



Elaboración: Propia

- 3) Para el E.Z (error cero) se tiene una función de membresía cerrada trapezoidal simétrica el cual está representada por el color violeta, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (0; 0,7) y valores intermedios de (0,1; 0,5).

Figura 3.61. Función de membresía para el E.Z (error cerro).

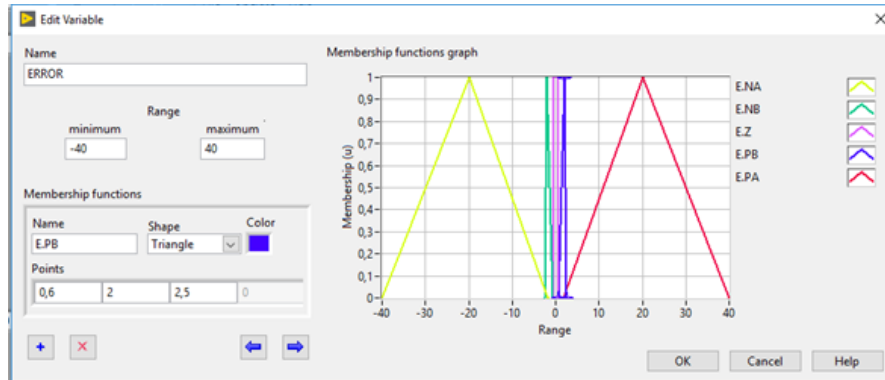


Elaboración: Propia

- 4) Para el E.PB (error positivo bajo) se tiene una función de membresía cerrada triangular no simétrica el cual está representada por el color azul, sus valores

dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (0,6; 2,5) y un valor intermedio de 2.

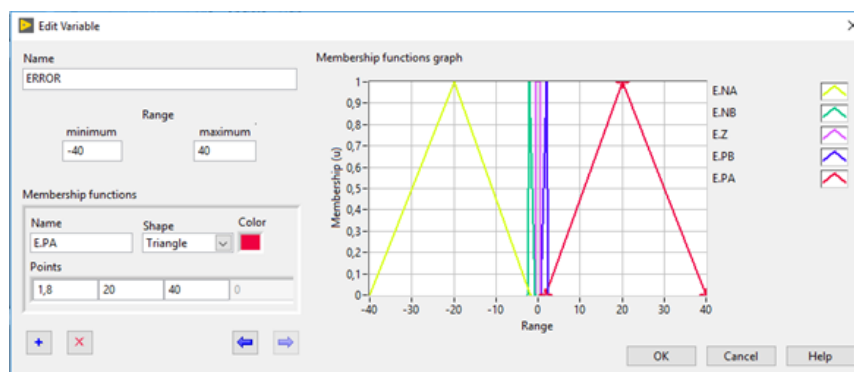
Figura 3.62. Función de membresía para el E.PB (error positivo bajo).



Elaboración: Propia

- 5) Para el E.PA (error positivo alto) se tiene una función de membresía cerrada triangular no simétrica el cual está representada por el color rojo, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (1,8; 40) y un valor intermedio de 20.

Figura 3.63. Función de membresía para el E.PA (error positivo alto).



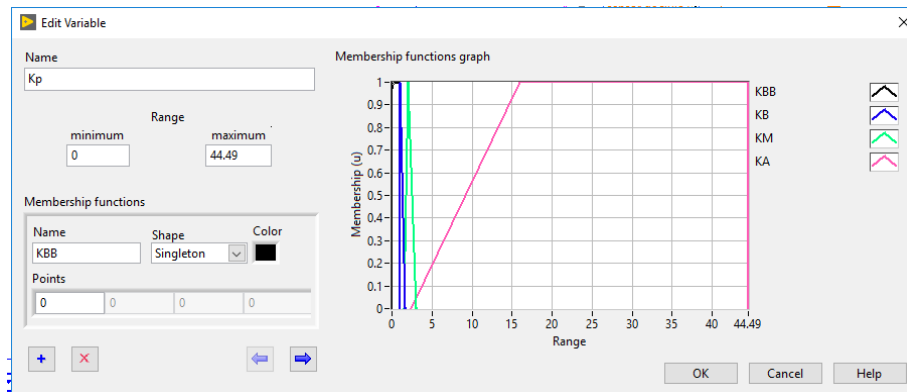
Elaboración: Propia

De igual forma se procedió para la derivada de error.

3.5.6.1.1. Para la variable de salida “Kp” se tiene:

- 1) Para el KBB (constante proporcional bajo bajo) se tiene una función de membresía singleton el cual está representada por el color negro, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció un valor de (0).

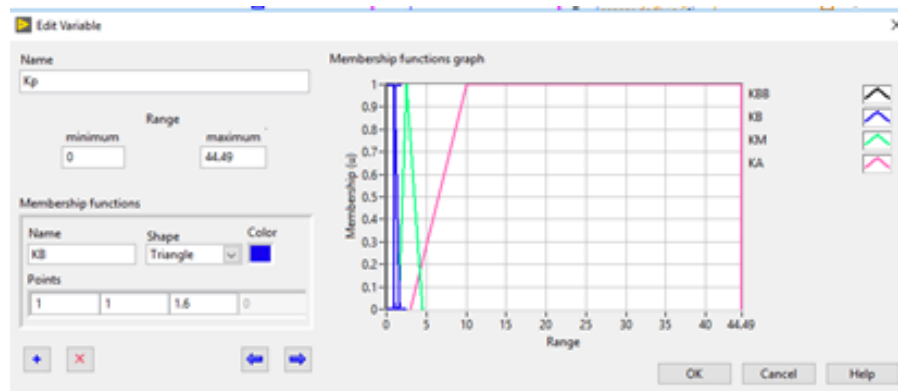
Figura 3.64. Función de membresía KBB (constante proporcional bajo bajo).



Elaboración: Propia

- 2) Para el K.B (constante proporcional baja) se tiene una función de membresía triangular cerrada asimétrica el cual está representada por el color azul, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (1;1,6) y un valor intermedio de 1.

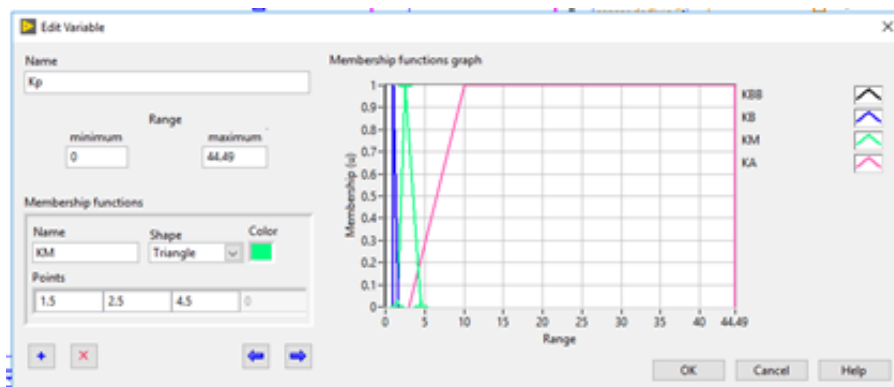
Figura 3.65. Función de membresía para el K.B (constante proporcional baja).



Elaboración: Propia

- 3) **Para el K.M** (constante proporcional media) se tiene una función de membresía cerrada triangular asimétrica el cual está representada por el color verde, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (1,5; 4,5) y un valor intermedio de 2,5.

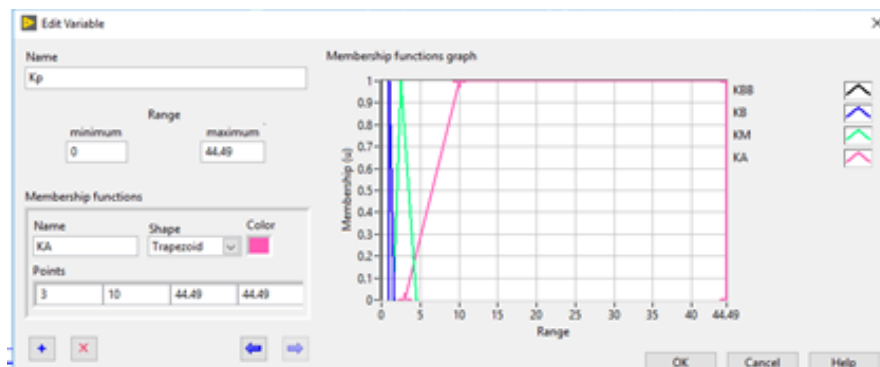
Figura 3.66. Función de membresía para el K.M (constante proporcional media).



Elaboración: Propia

- 4) **Para el K.A** (constante proporcional alta) se tiene una función de membresía cerrada trapezoidal no simétrica el cual está representada por el color rosado, sus valores dependen de la experiencia o criterio del diseñador, en este caso se estableció el rango entre (3; 44.49) y valores intermedios de (10; 44.49).

Figura 3.67. Función de membresía para el K.A (constante proporcional alta).



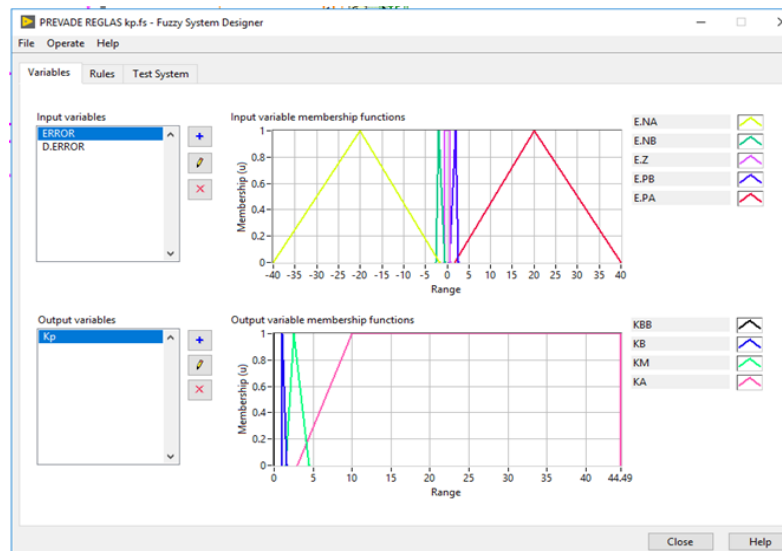
Elaboración: Propia

Tal como se mostró en el ejemplo anterior se procedió para las demás constantes las cuales son la constante de tiempo integral y constante de tiempo derivativa.

3.5.6.2. Reglas para la constante proporcional

A continuación, se muestra las variables con sus respectivos conjuntos difusos asociados a cada tipo de variable para las reglas de la constante proporcional.

Figura 3.68. Variables para las reglas de la constante proporcional.



Elaboración: Propia

Construcción de las reglas para la constante proporcional utilizando el metodo de centro de masa.

Tabla 3.13. Reglas de control para el Kp.

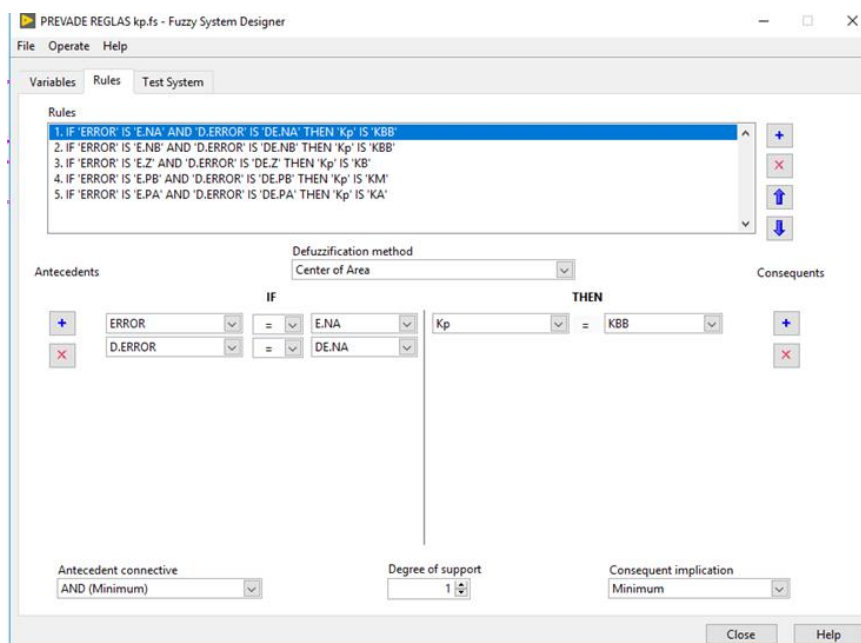
Variabes de entrada	Variabes de salida	Rango de variacion de kp
Si el error es negativo alto (E.NA) y	constante	
Si la Derivada del error es negativo alto (DE.NA)	proporcional bajo bajo.	$K_p = 0$

Si el error es negativo bajo (E.NB) y	constante	
Si la Derivada del error es negativo bajo (DE.NB)	proporcional bajo.	$K_p = 0$
Si el error es cero (E.Z) y	constante	$K_p = [1 \text{ a } 1.6]$
Si la Derivada del error es cero (DE.Z)	proporcional bajo.	
Si el error es positivo bajo (E.PB) y	constante	
Si la Derivada del error es positivo bajo (DE.PB)	proporcional medio.	$K_p = [1.5 \text{ a } 4.5]$
Si el error es positivo alto (E.PA) y	constante	
Si la Derivada del error es positivo alto (DE.PA)	proporcional alto.	$K_p = [3 \text{ a } 44.49]$

Elaboración: propia

Construcción de las reglas para la constante proporcional utilizando el método de centro de masa.

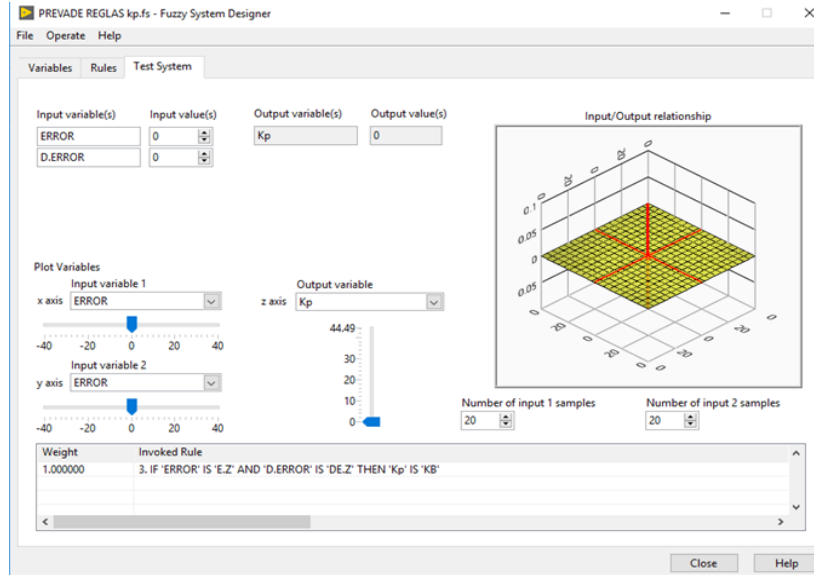
Figura 3.69. Reglas para la constante proporcional.



Elaboración: Propia

Prueba del sistema para visualizar que variables asignadas se están activando y cuál es su respectivo campo de acción.

Figura 3.70. Campo de acción de las variables de entrada y salida para la Kp

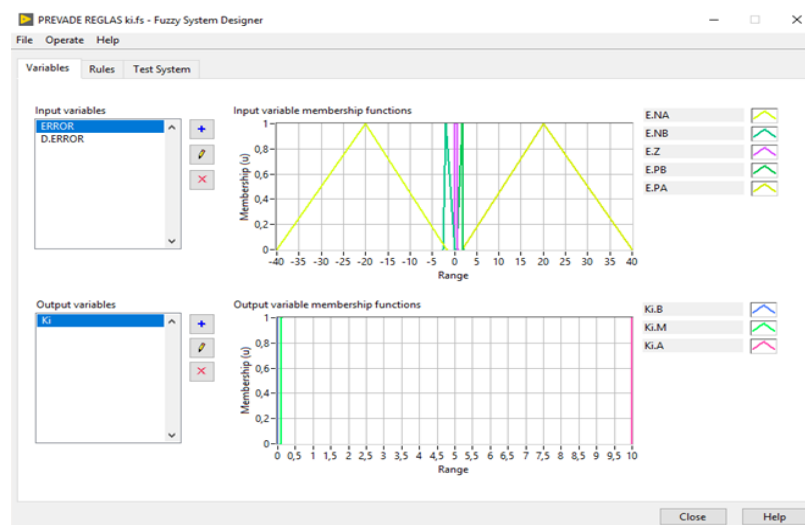


Elaboración: Propia

3.5.6.3. Reglas para la constante integral

A continuación, se muestra las variables con sus respectivos conjuntos difusos asociados a cada tipo de variable para las reglas de la constante integral.

Figura 3.71. Variables para las reglas de la constante integral



Elaboración: Propia

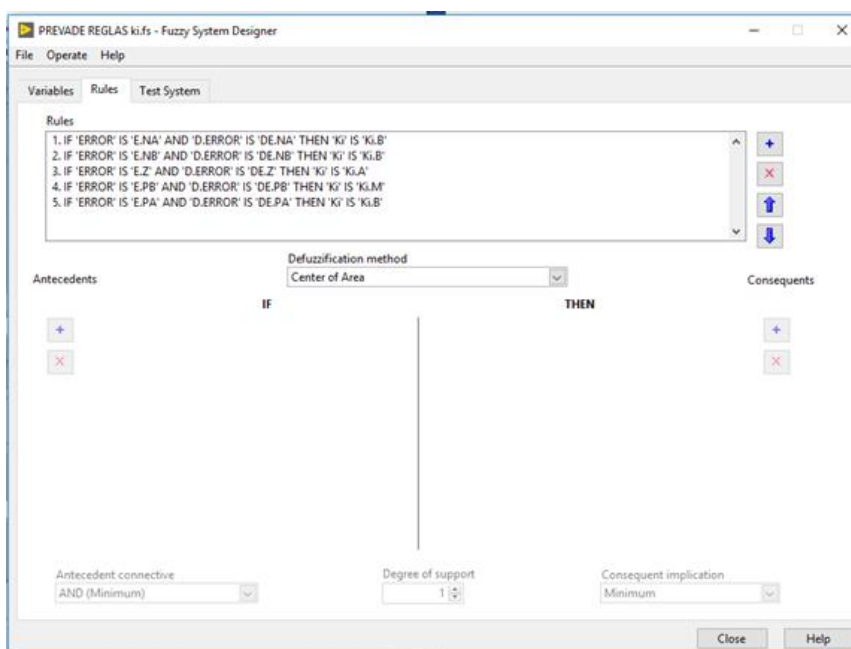
Construcción de las reglas para la constante integral utilizando el método de centro de masa.

Tabla 3.14. Reglas de control para el K_i .

Variables de entrada	Variables de salida	Rango de variación de k_i
Si el error es negativo alto (E.NA) y Si la Derivada del error es negativo alto (DE.NA)	constante integral bajo.	$K_i = 0$
Si el error es negativo bajo (E.NB) y Si la Derivada del error es negativo bajo (DE.NB)	constante integral bajo.	$K_i = 0$
Si el error es cero (E.Z) y Si la Derivada del error es cero (DE.Z)	constante integral alto.	$K_i = 10$
Si el error es positivo bajo (E.PB) y Si la Derivada del error es positivo bajo (DE.PB)	constante integral medio.	$K_i = [0.09 \text{ a } 0.11]$
Si el error es positivo alto (E.PA) y Si la Derivada del error es positivo alto (DE.PA)	constante integral bajo.	$K_i = 0$

Elaboración: propia

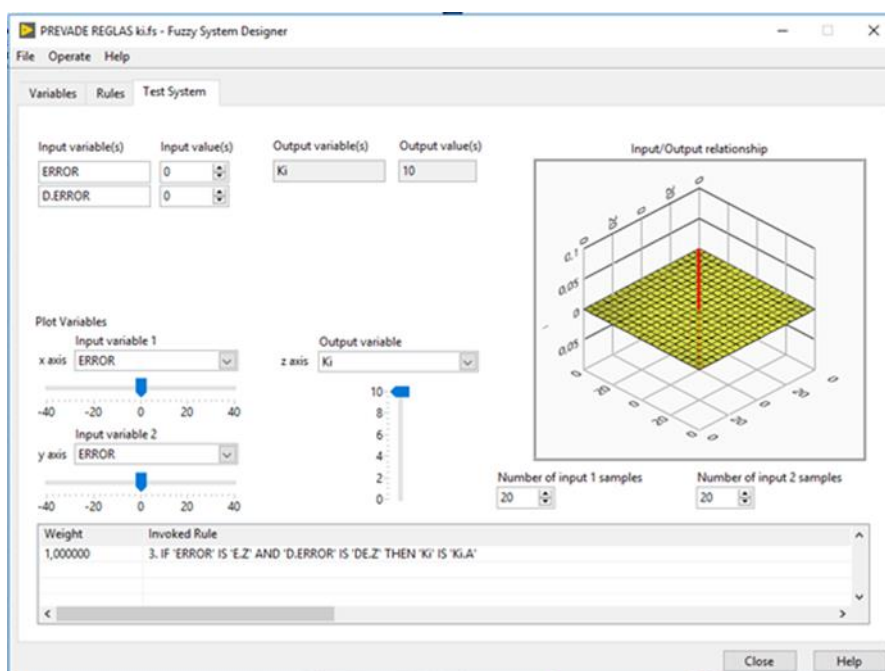
Figura 3.72. Reglas para la constante integral.



Elaboración: Propia

Prueba del sistema para visualizar que variables asignadas se están activando y cuál es su respectivo campo de acción.

Figura 3.73. Campo de acción de las variables de entrada y salida para Ki

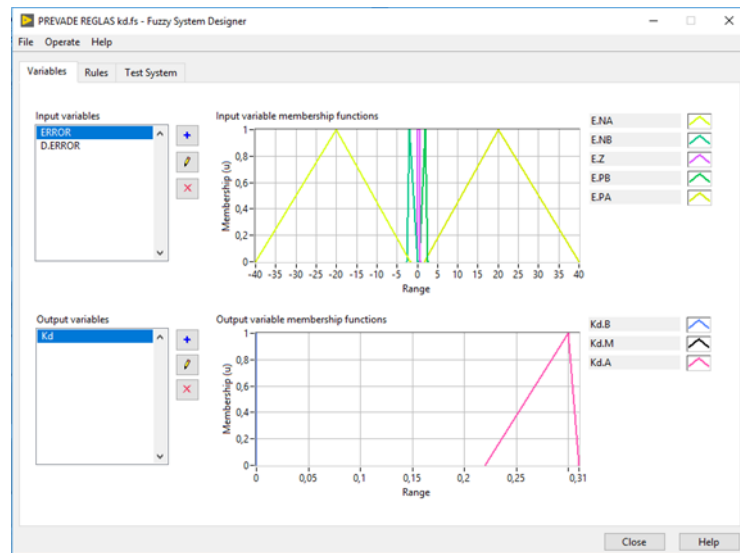


Elaboración: Propia

3.5.6.4. Reglas para la constante derivativa

A continuación, se muestra las variables con sus respectivos conjuntos difusos asociados a cada tipo de variable para las reglas de la constante derivativa.

Figura 3.74. Variables para las reglas de la constante derivativa.



Elaboración: Propia

Construcción de las reglas para la constante derivativa utilizando el método de centro de masa.

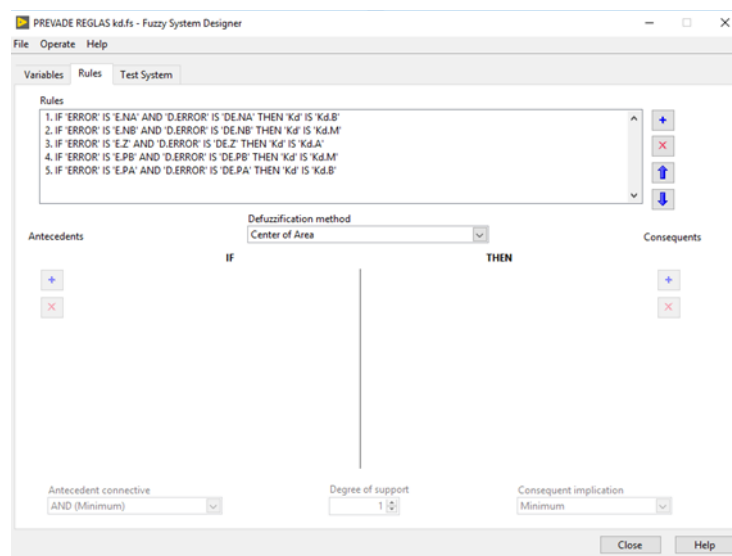
Tabla 3.15. Reglas de control para el Kd.

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	RANGO DE VARIACION DE Kd
Si el error es negativo alto (E.NA) y Si la Derivada del error es negativo alto (DE.NA)	constante derivativa bajo.	Kd = 0
Si el error es negativo bajo (E.NB) y Si la Derivada del error es negativo bajo (DE.NB)	constante derivativa medio.	Kd = 0

Si el error es cero (E.Z) y	constante	$K_d =$
Si la Derivada del error es cero (DE.Z)	derivativa alto.	[0.22 a 0.2.5]
Si el error es positivo bajo (E.PB) y	constante	
Si la Derivada del error es positivo bajo (DE.PB)	derivativa medio.	$K_d = 0$
Si el error es positivo alto (E.PA) y	constante	
Si la Derivada del error es positivo alto (DE.PA)	derivativa bajo.	$K_d = 0$

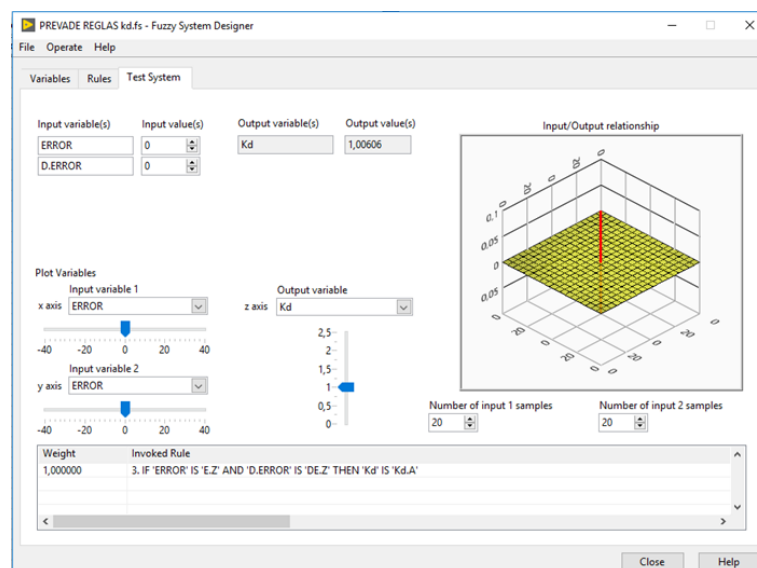
Elaboración: propia

Figura 3.75. Reglas para la constante derivativa.



Elaboración: Propia

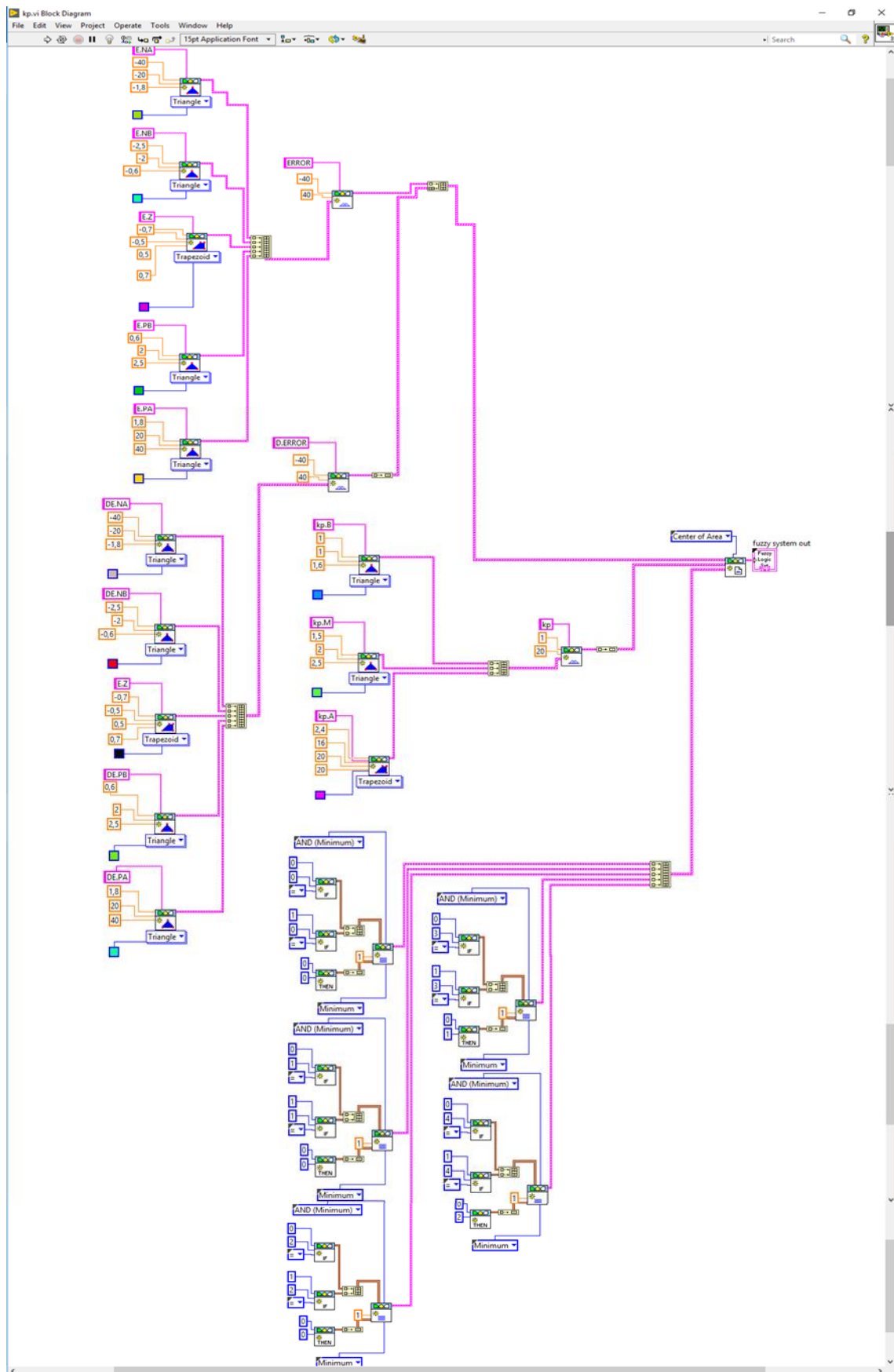
Prueba del sistema para visualizar que variables asignadas se están activando y cuál es su respectivo campo de acción.

Figura 3.76. Campo de acción de las variables de entrada y salida para K_d .

Elaboración: Propia

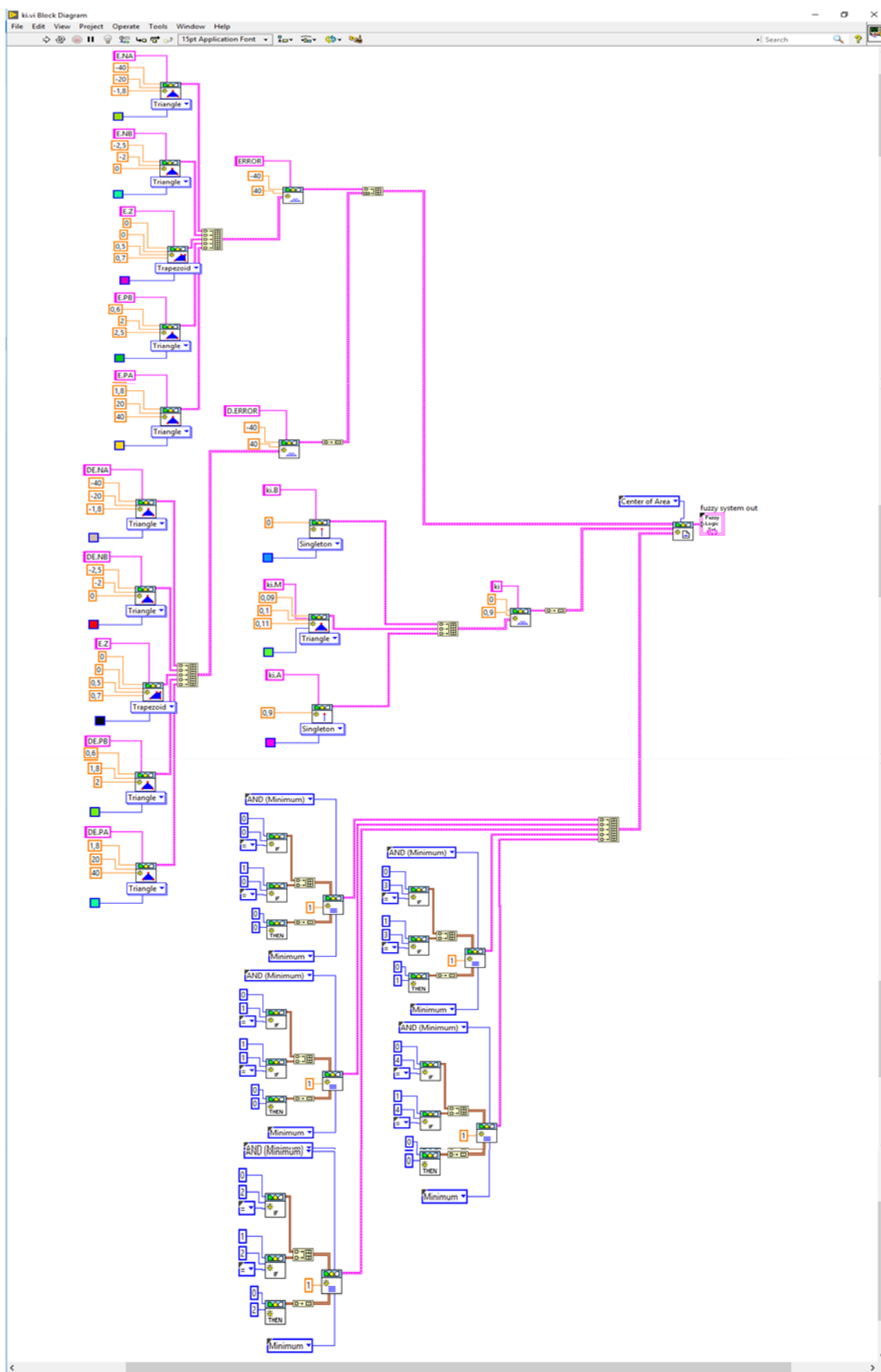
Diagramas de bloques para los parámetros del controlador PID dentro de los cuales puede variar cada de una de las constantes del controlador PID como son: la ganancia proporcional, constante de tiempo integral y constante de tiempo derivativa.

Figura 3.77. Diagrama de bloques del controlador difuso para Kp.



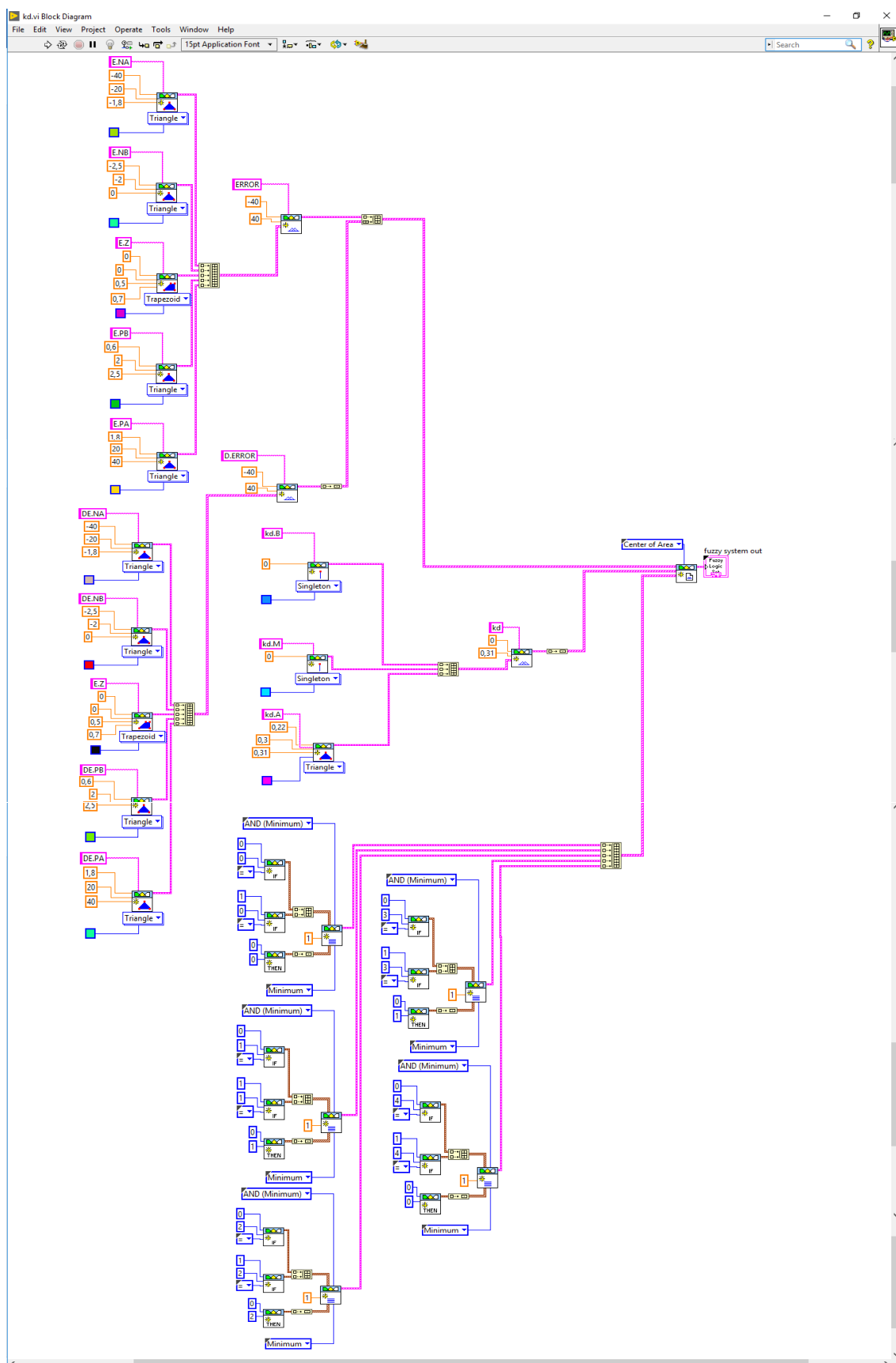
Elaboración: Propia

Figura 3.78. Diagrama de bloques del controlador difuso para la constante integral.



Elaboración: Propia

Figura 3.79. Diagrama de bloques del controlador difuso para la constante derivativa.



Elaboración: Propia

3.5.7. Funcionamiento del controlador PID - Difuso

Primero: el controlador difuso realiza el Proceso de fusificación las entradas (error, derivada del error).

Segundo: en controlador difuso se realiza el proceso de inferencia (da inicio a la ejecución de la base de reglas).

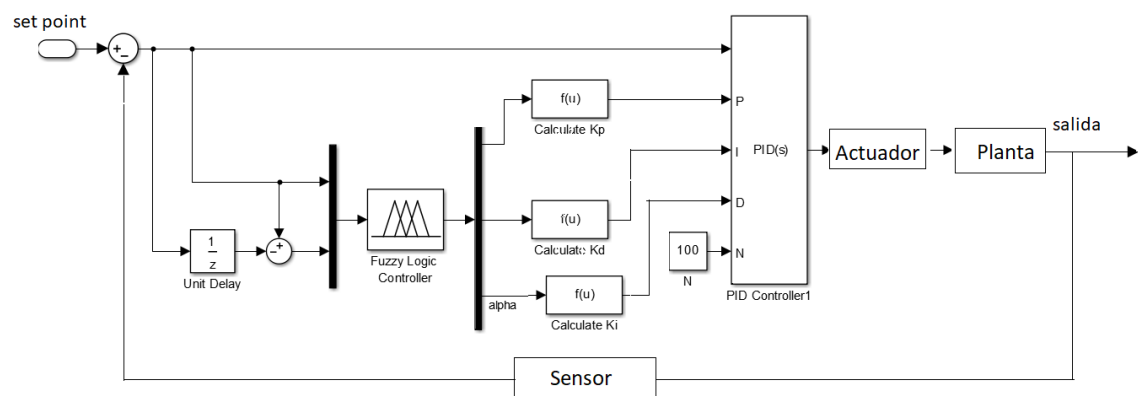
Tercero: el controlador difuso mediante la base reglas y las funciones de pertenencia establecidas por el diseñador proporciona las constantes más óptimas para controlador PID en conjuntos difusos.

Cuarto: el controlador difuso realiza el proceso de defusificación de las constantes del controlador PID convirtiéndolos en valores numérico.

Quinto: el controlador difuso autorregula las constantes que ingresan al controlador PID en tiempo real.

Sexto: el control difuso envía las constantes al controlador PID y este a su vez proporciona en su salida la variable manipula del sistema a controlar la cual varia conforma a las constantes.

Figura 3.80. Esquema de funcionamiento del control PID - difuso



Elaboración: Propia

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

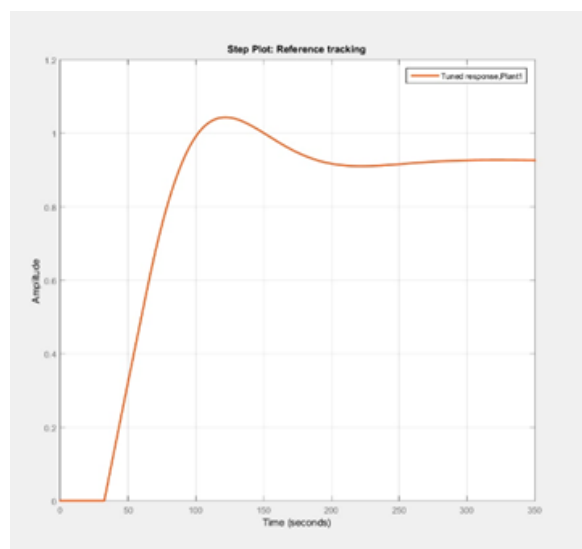
4.1.1. Instrumentación del proceso

En el módulo diseñado para la implementación del controlador PID, PID - difuso, se realizaron ensayos experimentales, esto con objetivo de afianzar los resultados que se obtuvieron en estos ensayos y así demuestren las ventajas y beneficios de un controlador frente al otro.

En la configuración realizada en el microcontrolador pro mini para el tratamiento de señales se hizo una comparación entre los valores reales y los valores que indican los sensores para su respectiva calibración.

Se realizó el respectivo modelado del sistema en el software Matlab, posterior a eso se realizó el modelado del control en el software Labview tanto para el control PID como Para el control PID – difuso.

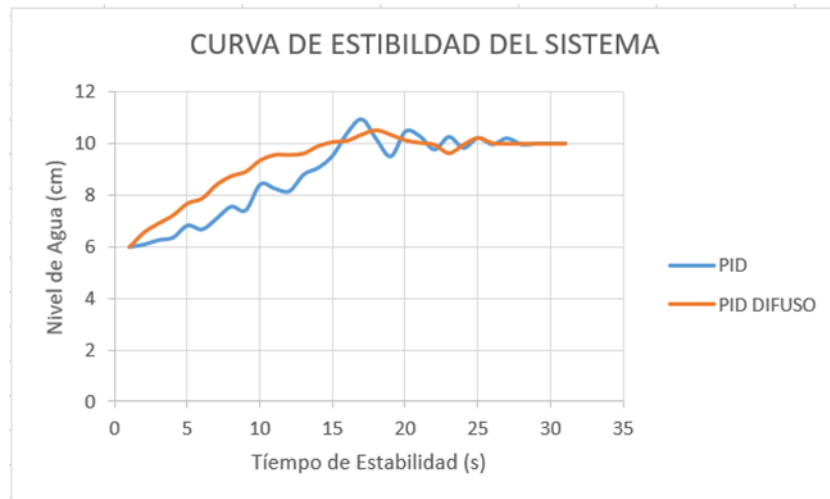
Figura 4.1. Curva de estabilización ideal del controlador PID en el software Matlab.



Elaboración: Propia

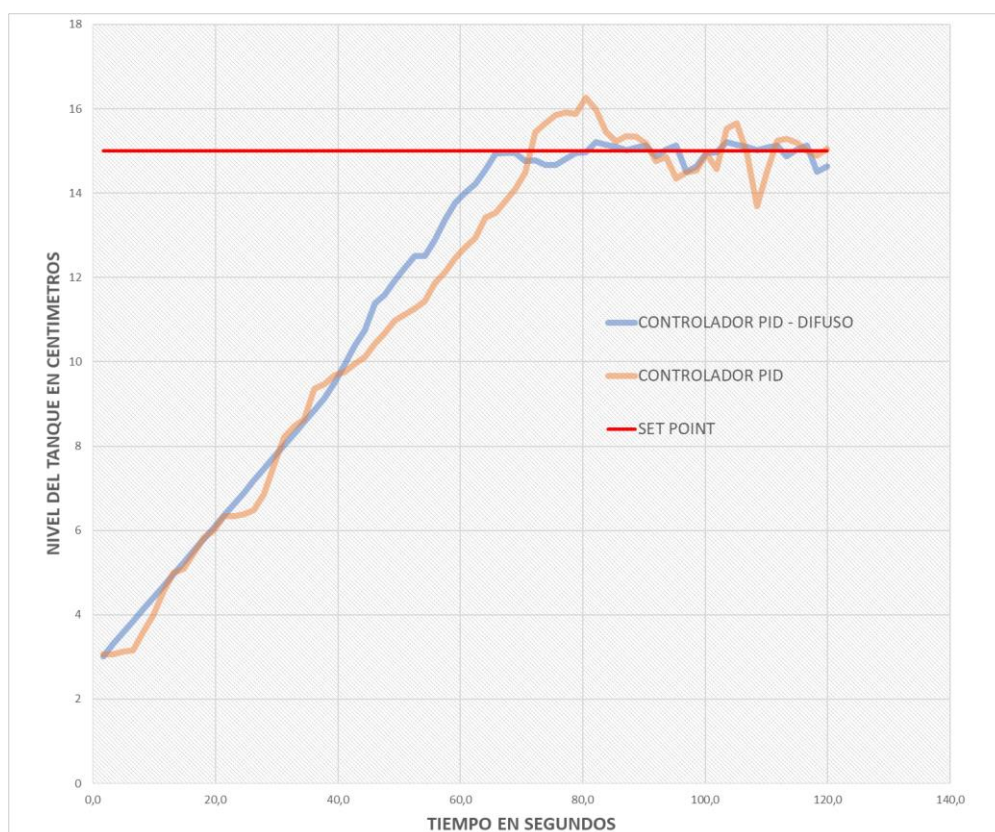
Se realizó el diseño de control PID en base a las constantes obtenidas con el software Matlab, y el diseño del control PID – difuso se realizó en el software Labview mediante el toolbox fuzzy logic de Labview.

Figura 4.2. Comparación de las señales de respuesta prueba 1.



Elaboración: Propia

Figura 4.3. Comparación de las señales de respuesta prueba 2.



Elaboración: Propia

Como se aprecia en la anterior figura el controlador PID difuso se estabiliza en un menor tiempo comparado con el controlador PID.

El controlador PID tiene un mayor sobre impulso que el controlador PID – difuso y esto se puede deber a que la constante proporcional es muy grande y además es un valor constante.

Con el controlador PID difuso se obtiene una mejor estabilización frente al controlador PID debido a que en el controlador PID – difuso las perturbaciones le afectan en menor medida que al controlador PID.

V. CONCLUSIONES

Se diseñó y realizó un análisis y comparación de un controlador PID y un controlador PID difuso en la plataforma de LabVIEW para el control de niveles de agua aplicados en el laboratorio de control y automatización de la EPIME

La instrumentación se realizó primeramente tratando la señal de entrada procedente de los sensores y realizando la respectiva configuración de cada uno de los componentes de nuestra planta para finalmente diseñar el sistema de control en la plataforma Labview con su respectivo scada.

Se realizó el modelado del sistema y su respectivo control en el software LabView.

Primero se desarrolló el controlador PID en el software Matlab mediante la herramienta Simulink el cual nos permite sintonizar mediante el método de prueba y error, obteniendo en nuestro caso un grado de confiabilidad de 92 por ciento aproximadamente. Los parámetros obtenidos son similares a los obtenidos por el método de curva de reacción de Ziegler Nichols.

Por otra parte, también se diseñó el controlador PID difuso en el software Labview, la parte difusa se diseñó usando el toolbox fuzzy logic de Labview, ésta es una herramienta que ahorra tiempo y esfuerzo al momento de describir un sistema difuso dado su entorno de fácil acceso y navegación. La sintonización de este controlador se realizó en base a prueba y error, es importante el conocimiento y la experiencia del diseñador ya que de ello dependerá el comportamiento de nuestra variable controlada.

A partir de los resultados de las simulaciones realizadas en el laboratorio de control y automatización de nuestra carrera profesional, se llegó a las siguientes conclusiones en base al análisis y comparación entre un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), y un controlador PID difuso, en el control de nivel de agua de un tanque,

analizando el comportamiento en tiempo de respuesta, recursos utilizados y comportamiento ante el ruido.

Con el controlador PID difuso se obtiene un mejor tiempo de respuesta frente al controlador PID, mejorando en un tiempo de 10 seg.

Con el controlador PID difuso se obtiene un menor sobre impulso frente al controlador PID.

Con el controlador PID difuso se obtiene una mejor estabilización frente al controlador PID.

Además, la simulación con el software LabVIEW nos permite tener una experiencia interactiva con el funcionamiento de nuestra planta ya que permite visualizar en tiempo real como es el funcionamiento de nuestra planta.

VI. RECOMENDACIONES

PRIMERO: Un error frecuente a la hora de diseñar un controlador para un proceso es no corregir o tratar las señales recibidas por los sensores por lo que se recomienda poner más énfasis en ese aspecto ya que depende de estos factores como será el comportamiento de nuestro controlador y cuan eficiente será.

SEGUNDO: Los resultados que obtengamos con el sistema de control fuzzy dependerá del programador y del conocimiento que se tenga de la planta.

TERCERO: se recomienda que durante el desarrollo de las pruebas se trabaje con recipientes de agua (cerrados). Para evitar las perturbaciones por sonidos externos.

CUARTO: se recomienda utilizar control Fuzzy ya que simplifica la complejidad del diseño, no requiere ningún modelo ni ecuaciones matemáticas complejas para el control.

QUINTO: se recomienda realizar comparaciones con otros tipos de control como un controlador difuso y un controlador PID – Difuso.

VII. REFERENCIAS

- A. Smith, C., & B. Corripio, A. (1991). *Control Automatico De Procesos Teoria y Practica*. Mexico: Tecnicos, S.A.
- Arias Alvarado, Y. E., & Piracoca Miguel, A. (2015). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL Y TEMPERATURA DEL TANQUE DE AGUA CALIENTE DE LA PLANTA DE PROCESOS ANÁLOGOS (PPA) (Tesis de Pregrado)*. Universidad Distrital “Francisco José De Caldas”, Bogota.
- Benitez Cadena, V. M., & Zalamea Balladares, J. M. (2005). *CONSTRUCCION DE UN MODULO DIDACTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS*. ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. JIEE.
- Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación industrial*. México: Alfaomega.
- Diciembre Sanahuja, S. (2017). *Sistemas de Control con Logica Difusa: Metodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) (Tesis de Pregrado)*. Universitat Jaume. I.
- Garcia Jaimes, L. E. (2009). *Control Digital, Teoria y Practica*. Medellin: Politecnico Colombiano J. I. C.
- Gonzales Conzuelo, M. B. (2007). *DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA IMPLEMENTACION DE ESTRATEGIAS DE CONTROL (Tesis de Posgrado)*. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey. N. L.
- Gonzales de Leon, S. (2013). *Control PID con Sintonización Difusa y Control Difuso (Tesis de Posgrado)*. Instituto Politecnico Nacional, Mexico D.F.

- Gutiérrez Hinestroza, M. d., & Iturralde Kure, S. A. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Santa Elena: UPSE.
- Gutierrez Marroquin, W., & Lopez Sotelo, J. A. (2011). Control Difuso Para Un Sistema de Nivel Implementado en un Automata Programable. *Dialnet-C*, 6.
- (s.f.). *Instrumentacion Virtual con LabView*.
- Karl J, A., & Tore Hagglund. (2009). *CONTROL PID AVANZADO*. España: PEARSON EDUCACION S. A.
- OGATA, K. (1998). *Ingenieria de control Moderna 3 ed*. Mexico: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICA, S.A.
- Pantoja Laces , W. A. (2013). *ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL PID Y PID DIFUSO EN LÓGICA RECONFIGURABLE (Tesis de Pregrado)*. Universidad del Istmo, Tehuantepec.
- Perez Limachi, F. R., & Canaza Zavala, M. (2009). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROLADOR POR COMPUTADORA EN TIEMPO REAL DE FLUJO Y NIVEL DE AGUA, UTILIZANDO LA TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ), VARIADOR DE VELOCIDAD Y PROGRAMACION LABVIEW (TESIS DE PREGRADO)*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, PUNO-PERU.
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingenieria*. Mexico: AlfaOmega.
- Rios Rivas, J. R. (2005). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE CONTROLADORES BASADOS EN LÓGICA DIFUSA (Tesis de Pregrado)*. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Ruiz Alcantara, A. (2007). *Control difuso vs. Control PID: análisis y numeración numérica (Tesis de Pregrado)*. Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto.

- Saldaña Zamora, E., Santos Espinoza, M., & Zuñiga Cortes, H. (2013). *Diseño y Construcción Del Sistema De Control Para Un Intercambiador De Calor Tubular (Tesis de Pregrado)*. Instituto Politecnico Nacional, Mexico D. F.
- Sensor Ultrasónico*. (2015, 6 6). Obtenido de electrocrea:
<https://electrocrea.com/blogs/tutoriales/33306499-sensor-ultrasonico>
- Sensor Ultrasonido HC-SR04*. (s.f.). Obtenido de Naylamp Mechatronics - Perú:
<https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- Vazques Roman, M. (2004). *CONTROL DIFUSO PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA ELÉCTRICA BASADO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM (Tesis de Posgrado)*. Centro Nacional de Investigacion y Desarrollo Tecnologico, Cuernava, MOR.
- W., B. (2001). *Ingenieria de Control 2a edicion*. Mexico: ALFAOMEGA.
- Zatarain Vera, O. (2011). Logica Difusa. *UAEH*, 37.

ANEXOS

8.1. ANEXO 01. PROGRAMACIÓN DE LOS SENSORES

******sensor de CAUDAL 02**

volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos

int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin "D2" nano

float factor_conversion = 5.5; //para convertir de frecuencia a caudal

//---Función que se ejecuta en interrupción-----

void ContarPulsos ()

{

NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos

}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----

int ObtenerFrecuencia()

{

int frecuencia;

NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos

interrupts(); //Habilitamos las interrupciones

delay(1000); //muestra de 1 segundo

noInterrupts(); //Desabilitamos las interrupciones

frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)

return frecuencia;

}

//salida de sensor de CAUDAL 2


```
const int pwm3 = 3;//conectar pin "D3" nano

int caudal01;// variable para la salisa PWM3

/***/entradas del sensor ULTRASONICO 02

int trigger =13;//conectar pin "13" nano

int echo =12;//conectar pin "12" nano

//salidas de PWM 1

const int pwm1 = 11;//conectar pin "11" nano

int voltaje;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  // ***/SENSOR ULTRASONICO 02 DIRECCIONAMIENTO

  pinMode(trigger,OUTPUT);

  pinMode(echo,INPUT);

  //direccionamos como salida SENSOR ULTRASONICO 02.

  pinMode(pwm1,OUTPUT);

  // DIRECCIONAMIENTO DE CAUDALIMETRO 02.

  pinMode(PinSensor, INPUT);

  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //(Interrupcion 0(Pin2),funcion,Flanco de

subida)
```

```
//direccionamos como salida SENSOR CAUDALIMETRO 01.  
  
pinMode(pwm3,OUTPUT);  
  
}  
  
void loop(){  
  
    // ***CAUDALIMETRO 02  
  
    float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la Frecuencia de los pulsos en Hz  
    float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion; //calculamos el caudal en L/m  
  
    //salida en PWM salida CAUDALIMETRO 2  
  
    caudal01= caudal_L_m * (255/27.1); //mutiplicamos una constante para que el valor  
este en "0 a 255"  
  
    analogWrite(pwm3, caudal01);  
  
    // SENSOR ULTRASONICO 02  
  
    long duracion;  
    float distancia;  
  
    digitalWrite(trigger,LOW);  
  
    delayMicroseconds(4);  
  
    digitalWrite(trigger,HIGH);  
  
    delayMicroseconds(10);  
  
    digitalWrite(trigger,LOW);
```

```
duracion = pulseIn(echo,HIGH);

duracion = duracion/2;

distancia = duracion/29.2;

//salidas en PWM salida ULTRASONICO 2

voltaje = distancia * (255/40);

analogWrite(pwm1, voltaje);

// lecturas de los sensores.

// LEENDO SENSOR ULTRASONICO 01 EN centimetros

Serial.print(distancia);

Serial.print (" Cm ; ");

// VISUALISAR FLUJO DE AGUA cadalimetro 1

Serial.print (caudal_L_m,3); // VISUALISAR FLUJO DE AGUA.

Serial.print (" L/m\t ; ");

Serial.println(voltaje);

delay(50);//esperamos 0.05segundos

//***sensor de CAUDAL 01

volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos

int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin "D2" nano

float factor_conversion = 7.5; //para convertir de frecuencia a caudal
```



```
//salidas de PWM 1

const int pwm1 = 11;//conectar pin "11" nano

int voltaje;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  // ***SENSOR ULTRASONICO 01 DIRECCIONAMIENTO

  pinMode(trigger,OUTPUT);

  pinMode(echo,INPUT);

  //direccionamos como salida SENSOR ULTRASONICO 01.

  pinMode(pwm1,OUTPUT);

  // DIRECCIONAMIENTO DE CAUDALIMETRO 01.

  pinMode(PinSensor, INPUT);

  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //(Interrupcion 0(Pin2),funcion,Flanco de
subida)

  //direccionamos como salida SENSOR CAUDALIMETRO 01.

  pinMode(pwm3,OUTPUT);

}

void loop(){

  // ***CAUDALIMETRO 01
```

```
float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la Frecuencia de los pulsos en Hz

float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion; //calculamos el caudal en L/m

//salida en PWM salida CAUDALIMETRO 1

caudal01= caudal_L_m * (255/7.6); //mutiplicamos una constante para que el valor este
en "0 a 255"

analogWrite(pwm3, caudal01);

// SENSOR ULTRASONICO 01

long duracion;

float distancia;

digitalWrite(trigger,LOW);

delayMicroseconds(4);

digitalWrite(trigger,HIGH);

delayMicroseconds(10);

digitalWrite(trigger,LOW);

duracion = pulseIn(echo,HIGH);

duracion = duracion/2;

distancia = duracion/29.2;

//salidas en PWM salida ULTRASONICO 1
```

```
voltaje = distancia * (255/40);
```

```
analogWrite(pwm1, voltaje);
```

```
// lecturas de los sensores.
```

```
// LEENDO SENSOR ULTRASONICO 01 EN centimetros
```

```
Serial.print(distancia);
```

```
Serial.print (" Cm ; ");
```

```
// VISUALISAR FLUJO DE AGUA cadalimetro 1
```

```
Serial.print (caudal_L_m,3); // VISUALISAR FLUJO DE AGUA.
```

```
Serial.print (" L/m\t ; ");
```

```
Serial.println(voltaje);
```

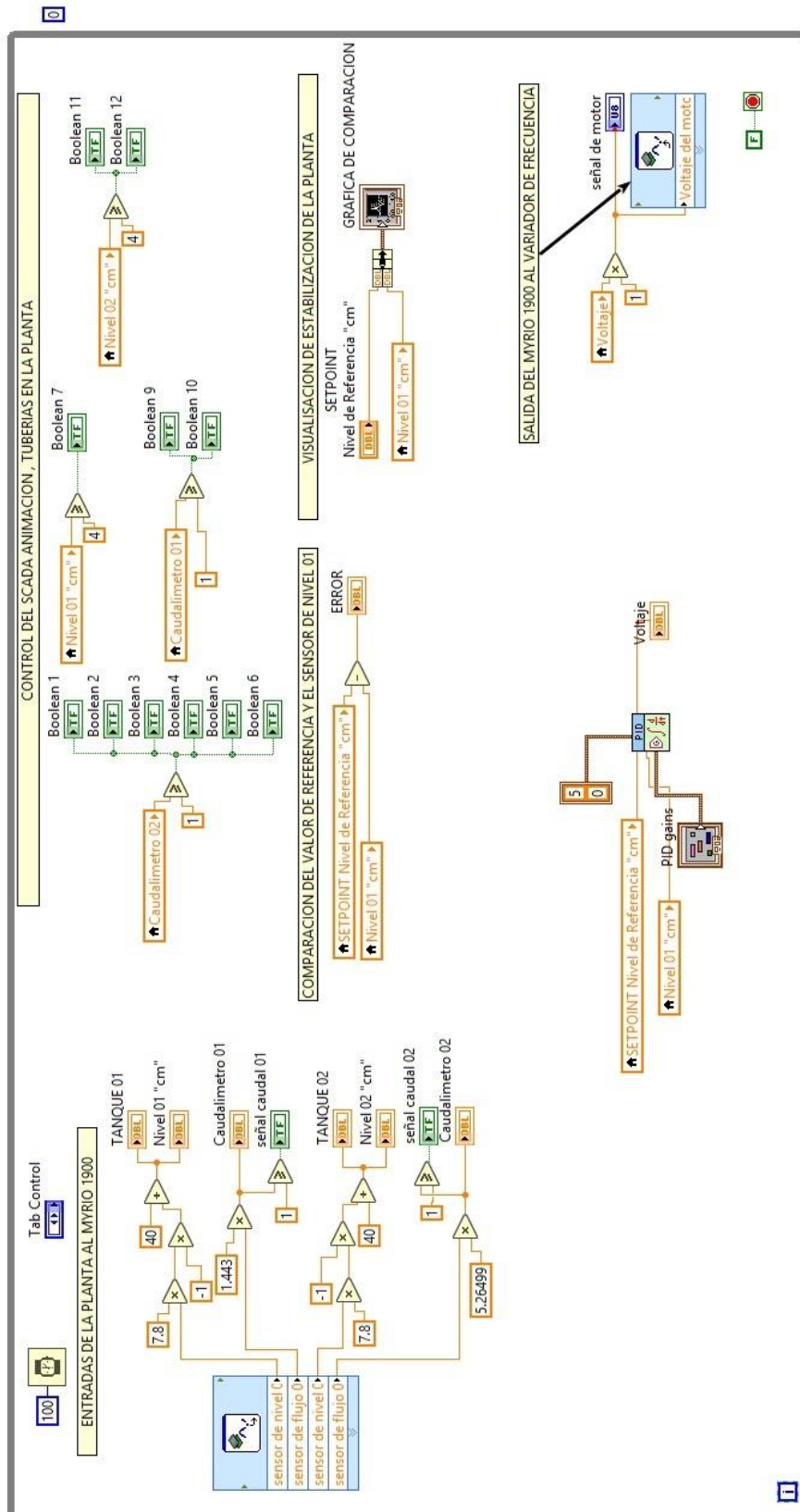
```
delay(50); //esperamos 0.05segundos
```

```
}
```

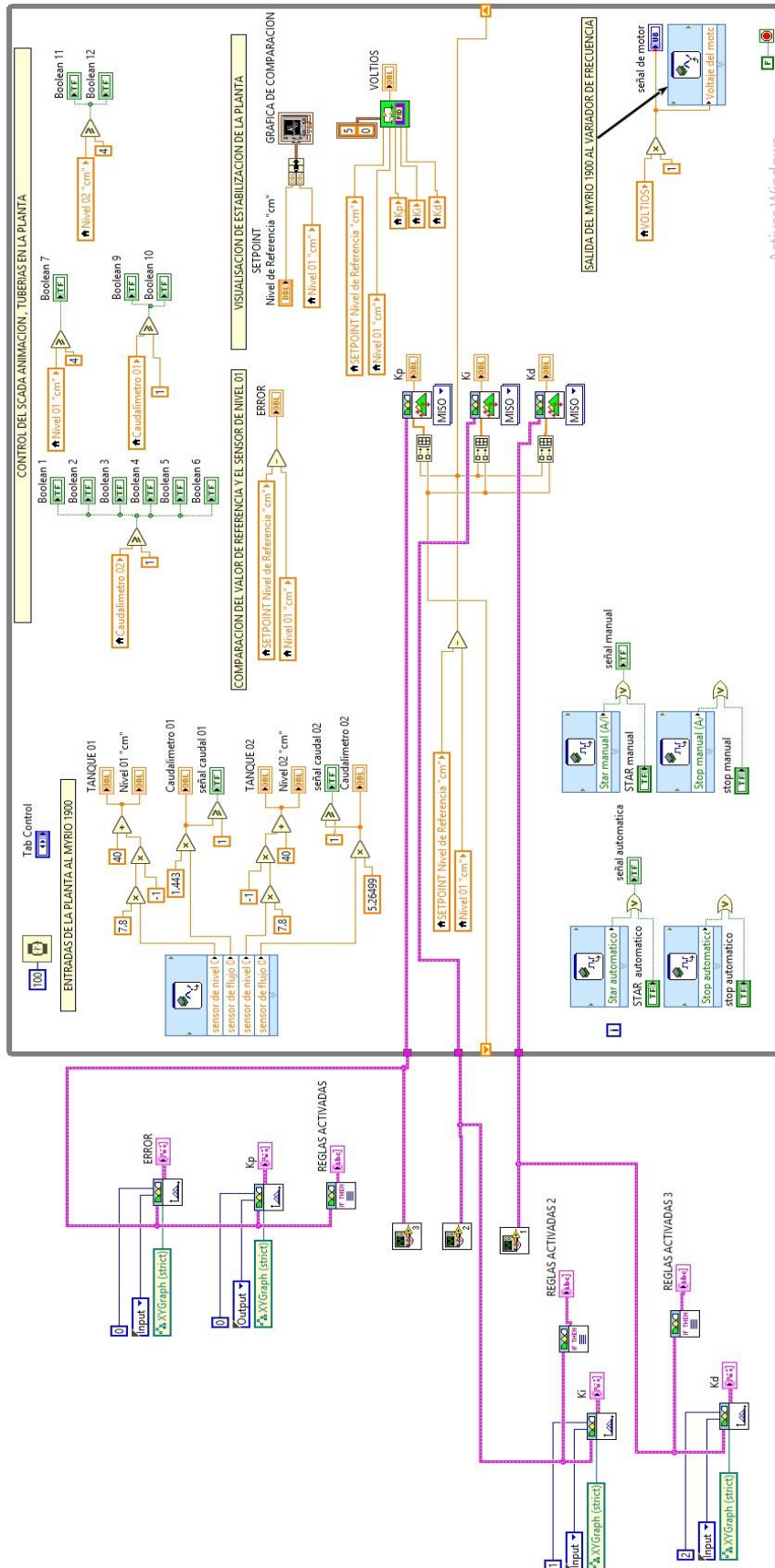
8.2. ANEXO 02. FOTO DEL MÓDULO DE NIVEL



8.3. ANEXO 03. PROGRAMACIÓN PID



8.4. ANEXO 04. PROGRAMACIÓN PID - DIFUSO



Activar Windows
Ve a Configuración para activar Windows.