

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
DESARROLLO DEL CONTROL ELECTRÓNICO DEL MÓDULO
DIDÁCTICO DE NIVEL Y CAUDAL PARA EL LABORATORIO DE
ELECTRÓNICA DE LA UPS**

**AUTOR:
EDISON FABRICIO ESPINOZA QUISHPE**

**TUTOR:
HAMILTON LEONARDO NÚÑEZ VERDEZOTO**

Quito, agosto del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Edison Fabricio Espinoza Quishpe, con documento de identificación N° 171995668-0 respectivamente, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “DESARROLLO DEL CONTROL ELECTRÓNICO DEL MÓDULO DIDÁCTICO DE NIVEL Y CAUDAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE LA UPS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Edison Fabricio Espinoza Quishpe

C.I. 1719956680

Quito, agosto del 2019

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico, “DESARROLLO DEL CONTROL ELECTRÓNICO DEL MÓDULO DIDÁCTICO DE NIVEL Y CAUDAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE LA UPS”, realizado por Edison Fabricio Espinoza Quishpe obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2019.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Hamilton Leonardo Núñez Verdezoto', written in a cursive style.

Hamilton Leonardo Núñez Verdezoto
C.I. 1712981487

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación es el esfuerzo y la constancia del proceso de aprendizaje para cumplir un sueño y alcanzar una meta propuesta en mi vida, junto a todas las personas, compañeros, amigos que fueron parte de estos años de universidad. A los docentes que compartieron sus enseñanzas para formar un profesional de carácter con sólidos conocimientos y valores para afrontar los retos de la vida.

Este proyecto lo dedico a mi madre Yolanda por inculcarme el valor de la responsabilidad, esfuerzo y constancia en cada paso para alcanzar lo que uno desea para su vida.

A mi padre Carlos por formar mi carácter para llegar a ser lo que soy, un hombre de bien, emprendedor, para tener éxito en cumplir los sueños.

A mis hermanas Gabriela, Cristina y Verónica por ser un apoyo incondicional, brindándome su protección en todo momento, por guiar mi camino como su hermano menor.

Edison

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a todos los docentes que fueron parte de las enseñanzas tanto éticas, espirituales y herramientas de formación profesional para llegar a ser un profesional de bien. Al Ingeniero Hamilton Núñez por ser guía y ayudarme a lograr culminar con éxito este trabajo de titulación.

Agradezco a mi familia por ser siempre la luz para las decisiones en mi camino manteniéndose presente en cada una de las etapas de mi vida, depositando toda su confianza en mí para salir adelante con energía, apoyo, fuerza e inteligencia.

¡Gracias familia!

Edison

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
ANTECEDENTES	1
1.1 Problema de estudio	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Metodología	2
CAPÍTULO 2.....	3
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	3
2.1 Sistema Embebido.....	3
2.2 Sistema de Control	4
2.3 Sistema de Control Realimentado.....	5
2.4 Controlador PID.....	6
2.5 Lógica Difusa	6
2.6 Interface Humano Máquina - HMI	7

2.7	Microcontrolador.....	8
2.8	Aplicaciones en proyectos similares para control de nivel	9
2.8.1	Aplicación 1	9
2.8.2	Aplicación 2	10
2.8.3	Aplicación 3	11
CAPÍTULO 3	12
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	12
3.1	Descripción del Hardware.....	12
3.1.1	Bomba centrífuga de agua.....	12
3.1.2	Sensor de Flujo	13
3.1.3	Válvula de bola de latón motorizada	14
3.1.4	Servo digital JX.....	15
3.1.5	Pantalla Nextion	16
3.1.6	Microcontrolador smd AT-MEGA 328.....	17
3.1.7	Amplificador operacional LM 358	18
3.1.8	Tanque principal y reservorio.....	19
3.1.9	Variador de Frecuencia Delta VFD007EL11A	20
3.1.10	Sensor de Nivel HC-SR04.....	21
3.1.11	Breaker principal termo magnético	22
3.1.12	Fuente de alimentación continua formato industrial	22
3.2	Diseño de la Estructura	23
3.2.1	Tanque principal de medición y reservorio de agua.....	23
3.2.3	La servo válvula	24
3.2.4	Diagrama P&ID.....	27
3.2.5	Diagrama del tablero de control	28
3.2.6	Diseño de la tarjeta de control.....	29
3.3	Descripción del Software	30

3.3.1 Sistema de control propuesto	30
3.3.2 IDE de Arduino	30
3.3.3 Nextion editor software	30
3.3.4 Diagrama de flujo algoritmo de control proporcional	31
3.3.5 Diagrama del flujo algoritmo del control PID	32
3.3.6 Diagrama de flujo algoritmo de control Fuzzy	35
3.3.7 Programación del Microcontrolador	36
3.3.8 Interfaz de Usuario	36
3.3.9 Interfaz control proporcional	37
3.3.10 Interfaz control PID	38
3.3.11 Interfaz control Fuzzy	39
3.3.12 Interface Humano Máquina principal	42
CAPITULO 4	44
PRUEBAS Y RESULTADOS	44
4.1 Descripción del funcionamiento del Módulo	44
4.2 Resultado de la función de transferencia	45
4.3 Resultado del algoritmo proporcional	46
4.4 Resultado del algoritmo PID	47
4.5 Resultado del algoritmo Fuzzy	49
4.6 Análisis y comparación de resultados de los algoritmos de control	51
CAPÍTULO 5	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1 Conclusiones	53
5.2 Recomendaciones	55
ANEXOS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema general de un sistema embebido	4
Figura 2.2 Diagrama de un sistema de control.....	4
Figura 2.3 Diagrama de un sistema de control realimentado.....	5
Figura 2.4 Diagrama de un control PID realimentado	6
Figura 2.5 Diagrama de bloques lógica difusa.....	7
Figura 2.6 Panel HMI.....	8
Figura 2.7 Bloques funcionales microcontrolador	8
Figura 2.8 Sistema de control PID	10
Figura 2.9 Plataforma de procesos continuos	10
Figura 2.10 Interfaz para la implementación de control de nivel	11
Figura 3.1 Bomba centrífuga de Agua	12
Figura 3.2 Sensor de Flujo Saier	13
Figura 3.3 Válvula motorizada TM-MOC	14
Figura 3.4 Servo Digital JX5521	15
Figura 3.5 Pantalla Nextion NX8048T070	16
Figura 3.6 Microcontrolador AT-MEGA 328.....	17
Figura 3.7 Amplificador Operacional LM 358	18
Figura 3.8 Tanques del módulo didáctico de nivel y caudal.....	19
Figura 3.9 Variador VFD007EL11A	20
Figura 3.10 Sensor de Nivel HC-SR04	21
Figura 3.11 Breaker termo magnético.....	22
Figura 3.12 Fuente de voltaje continuo.....	23
Figura 3.13 Impresiones 3D del Engranaje y piñón para la servo válvula	27
Figura 3.14 Acople de servo válvula.....	27
Figura 3.15 Diagrama P&ID	28
Figura 3.16 Tablero de control vista exterior e interior	29
Figura 3.17 Tarjeta de control.....	29
Figura 3.18 Entorno de programación Arduino	30
Figura 3.19 Entorno de programación Nextion.....	31
Figura 3.20 Diagrama algoritmo proporcional.....	32
Figura 3.21 Diagrama algoritmo PID.....	34
Figura 3.22 Diagrama algoritmo fuzzy	35
Figura 3.23 Interfaz de Usuario	36

Figura 3.24 Selección Algoritmo proporcional.....	37
Figura 3.25 Selección Algoritmo PID.....	38
Figura 3.26 Conjuntos Difusos para Nivel y Voltaje.....	41
Figura 3.27 Selección Algoritmo Fuzzy	41
Figura 3.28 HMI principal Tipos de Control	42
Figura 4.1 Nivel del tanque reservorio a 41 litros.....	44
Figura 4.2 Prueba de elementos del Módulo desde pantalla Nextion	45
Figura 4.3 Función de transferencia desde el software Matlab.....	45
Figura 4.4 Prueba algoritmo proporcional	47
Figura 4.5 Prueba Algoritmo PID	49
Figura 4.6 Prueba Algoritmo Fuzzy.....	50
Figura 4.7 Comparación de Señales de control.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características Bomba centrífuga	13
Tabla 3.2 Características Sensor de flujo Saier.....	14
Tabla 3.3 Características válvula motorizada TM-MOC.....	15
Tabla 3.4 Características Servo digital JK5521	16
Tabla 3.5 Características pantalla NX8048T070	17
Tabla 3.6 Características microcontrolador At-mega 328	18
Tabla 3.7 Características Amplificador Operacional LM358	19
Tabla 3.8 Características de los tanques del módulo didáctico.....	20
Tabla 3.9 Características Variador Delta Electronics	21
Tabla 3.10 Características sensor de nivel SR04T.....	22
Tabla 3.11 Descripción Fuente de Alimentación VDC	23
Tabla 3.12 Descripción de elementos Diagrama P&ID.....	28
Tabla 3.13 Acciones de las constantes del PID.....	33
Tabla 3.14 Descripción Interfaz Usuario	36
Tabla 3.15 Descripción pantalla algoritmo Proporcional	37
Tabla 3.16 Descripción pantalla algoritmo PID.....	39
Tabla 3.17 Funciones de Membresía Fuzzy.....	40
Tabla 3.18 Reglas de Control.....	40
Tabla 3.19 Descripción pantalla algoritmo Fuzzy	42
Tabla 3.20 Descripción HMI Tipos de Control	43
Tabla 4.1 Pruebas control proporcional	46
Tabla 4.2 Pruebas control PID	48
Tabla 4.3 Pruebas control Fuzzy	50
Tabla 4.4 Análisis y comparación de Pruebas	52

RESUMEN

El módulo de sistema de tanques perteneciente al Laboratorio de Control de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur en Quito, trata de solventar fines académicos en automatización que permiten controlar variables de nivel y caudal de líquidos. En el presente proyecto se implementó tres algoritmos de control, como son: P, PID y Fuzzy, para el uso de las variables nivel y caudal controlados por servoválvula, sensor de flujo, sensor de nivel y la bomba centrífuga por medio del variador de frecuencia en el sistema de tanques. Primero se realizó la explicación de cada componente que interviene en el sistema de tanques para nivel y caudal junto con la selección apropiada de materiales que cumplan con las necesidades de funcionamiento. Además, se elaboró los diagramas de flujo para los algoritmos implementados y el diagrama de los elementos del tablero de control. Después se realizó la programación del microcontrolador y pantalla HMI, siguiendo con la conexión de los elementos electrónicos durante la implementación. Para finalizar, se verificó su funcionamiento mediante pruebas de cada algoritmo registrando los resultados en el trabajo escrito. Se concluyó que las variables nivel y caudal deben tener una sincronización para cada proceso de control.

Palabras clave: Control de nivel, control de flujo, algoritmo de control, PID, Fuzzy.

ABSTRACT

The tank system module belonging to the Electronic Engineering Career Control Laboratory of the Universidad Polytechnic Salesian campus Sur in Quito, tries to solve academic purposes in automation that allow to control variables of liquid level and flow. In the present project, three control algorithms implemented, such as: P, PID and Fuzzy, for the use of the level and flow variables controlled by servo valve, flow sensor, level sensor and the centrifugal pump by means of the frequency inverter in the tank system. First, the explanation of each component that intervenes in the tank system for level and flow was carried out together with the appropriate selection of materials that meet the operating needs. In addition, the flow diagrams for the implemented algorithms and the diagram of the elements of the control board were elaborated. Then the programming of the microcontroller and HMI screen carried out, continuing with the connection of the electronic elements during the implementation. Finally, its operation verified through tests of each algorithm recording the results in the written work. It was concluded that the variables level and flow must have synchronization for each control process.

Keywords: Level control, flow control, control algorithm, PID, Fuzzy.

INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo de titulación se detalla el desarrollo del control automático para el módulo didáctico de nivel y caudal para el Laboratorio de Control en la Carrera de Ingeniería Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana en Quito, Campus Sur.

En el capítulo 1, se detalla los antecedentes y la problemática existente del estado del módulo didáctico entre sus componentes electrónicos y mecánicos para el laboratorio de control, por otra parte, se describen los objetivos propuestos del trabajo de titulación.

En el capítulo 2, se explica la fundamentación teórica sobre sistema embebido, sistema de control, sistema de control realimentado, lógica difusa, algoritmo PID, microcontrolador, la Interfaz Humano Máquina (HMI) y ejemplos de aplicaciones en proyectos similares con algoritmos de control.

En el capítulo 3, se detalla la estructura de cada componente a utilizar en el proceso del control electrónico para nivel y caudal de líquidos, también se incluye los diagramas de flujo del proceso, diagrama de tuberías, ecuaciones del cálculo de piñones por módulo, diagrama eléctrico del tablero de control, potencia y protecciones, la programación del microcontrolador. Se configura la interfaz de usuario y posteriormente se implementa los algoritmos de control.

En el capítulo 4, se realiza la explicación de los controladores implementados y las pruebas del control automático de nivel y caudal para el módulo.

En el capítulo 5, se define las conclusiones y recomendaciones acorde al proceso del proyecto realizado y a los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento del módulo.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Problema de estudio

El módulo didáctico ubicado en los laboratorios de la UPS con el tiempo sus elementos mecánicos y electrónicos fueron deteriorándose y otros usados en diferentes proyectos, dejando el módulo inhabilitado por lo que se encuentra almacenado sin darle ningún uso, se requiere una revisión y mantenimiento de los posibles elementos que se encuentren en funcionamiento.

Las variables a ser controladas por este módulo son nivel y caudal las cuales son muy utilizadas en la industria y de ahí su importancia para que los estudiantes sepan controlarla, pero en el laboratorio de teoría de control solo existe un módulo que es insuficiente para la realización de prácticas y deben esperar turnos para trabajar, lo que implica pérdidas de tiempo.

1.2 Justificación

En la materia de teoría de control, que se imparte como formación profesional en la Carrera de Ingeniería Electrónica, se requiere que los estudiantes tengan la habilidad, herramientas y conocimiento adecuado en el desarrollo de prácticas que puedan establecer un sistema de control para el comportamiento de sistemas dinámicos aplicando los conceptos de la materia en lo práctico.

Con esto se toma en cuenta que en este laboratorio solo existe un módulo para el control de nivel y caudal de líquidos comprado a la empresa Festo, el cual no abastece realizar prácticas. Por la gran cantidad de estudiantes se hace necesario de este módulo actualizado para complementar las prácticas en el laboratorio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un módulo didáctico de nivel y caudal de líquidos para el uso de prácticas de teoría de control.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el módulo didáctico de control de nivel y caudal de líquidos para la determinación del estado de sus componentes.
- Diseñar la repotenciación del sistema de control de nivel y caudal de líquidos para múltiples aplicaciones y flexibilidad con sistemas de control moderno.
- Implementar tres algoritmos de control con las variables de nivel y caudal de líquidos para la validación del sistema diseñado.
- Realizar un manual de prácticas tanto para estudiantes y docentes en la materia de teoría de control que sirva como documento base en la realización de las mismas.

1.4 Metodología

Se va a realizar una caracterización del módulo utilizando el método de observación, para la verificación del estado actual de sus componentes mecánicos y eléctricos que forman parte del proceso de nivel y caudal. Todos los elementos serán sometidos a una revisión y mantenimiento.

En el diseño de los algoritmos de control en el módulo, se utilizará el método analítico, en el cual se manipulará las variables de entrada para obtener una salida adecuada acorde a la programación. Para realizar la implementación de los algoritmos de control se utilizará el método práctico.

Para las pruebas de funcionamiento se aplicará el método experimental utilizando un manual de prácticas previamente elaborado, que dependerá del tipo de algoritmo de control aplicado.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Sistema Embebido

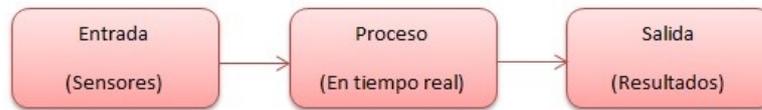
Un sistema embebido, son circuitos que tienen la capacidad de procesar datos para aplicaciones dedicadas, la evolución de la tecnología digital hace que la mayoría de circuitos o microprocesadores tengan aplicaciones de tipo específico, conocido como en la mayoría de los casos un sistema computacional en tiempo real, cada microcontrolador formado como base de un sistema embebido puede ser programado en su lenguaje ensamblador. (Jiménez, 2011)

Dentro de las características que diferencian los sistemas embebidos de los sistemas computacionales se tienen:

- La implementación se puede realizar en diferentes arquitecturas de microprocesadores o microcontroladores.
- Bajo costo de producción en comparación a un sistema computacional.
- Diferentes aplicaciones con bajos consumos de energía.
- Cumplir con la necesidad de una aplicación específica que se requiere a nivel de software y hardware dedicado.
- Poder usar diferentes tipos de comunicación, con conexión por cable o inalámbrica como Wifi o USB.

La Figura 2.1 ilustra el funcionamiento de un sistema embebido en términos generales.

Figura 2.1 Esquema general de un sistema embebido



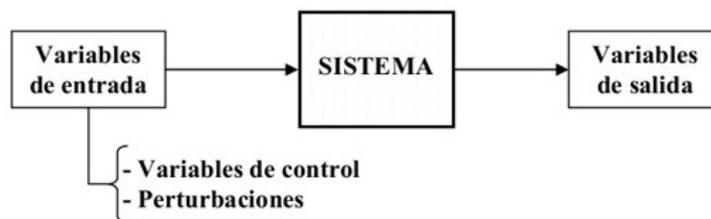
Elaborado por: Edison Espinoza

2.2 Sistema de Control

Un sistema de control procesa una serie de variables de entrada o señal de control, que puede ser una condición o cantidad que el controlador modifica, con resultados en variables de salida o señal controlada. (Ogata, 2010)

La Figura 2.2 ilustra los elementos de un sistema de control:

Figura 2.2 Diagrama de un sistema de control



Fuente: (Bravo, 2012)

- **Planta:** Objeto o conjunto de elementos que interactúan como parte de una máquina para un fin determinado.
- **Proceso:** Operación en conjunto con los objetos que interactúan en la planta como variable a ser controlada.
- **Sistema:** Elementos que trabajan en conjuntos con un objetivo a cumplir para la planta.
- **Perturbaciones:** Señales que afectan de forma negativa la variable de salida del sistema.

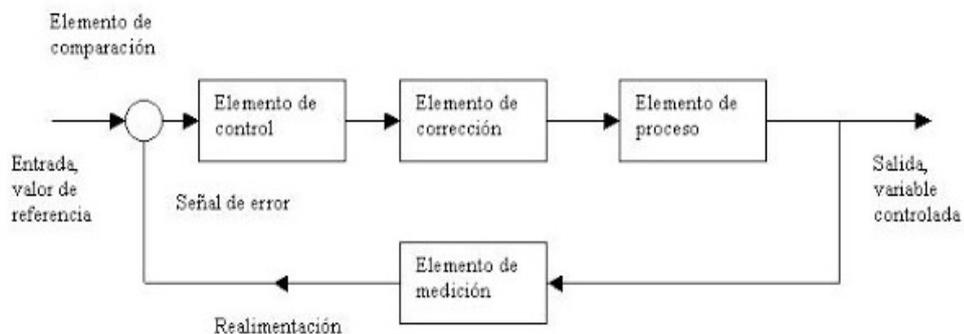
2.3 Sistema de Control Realimentado

Un sistema de control realimentado se lo conoce también como un sistema de control en lazo cerrado. Estos sistemas relacionan la salida con su entrada de referencia, al comparar las variables de salida con las variables de entrada usan la diferencia como medio de control. (Ogata, 2010)

En un sistema en lazo cerrado se le introduce al controlador una señal de error, que es la diferencia entre la variable de entrada y la variable de salida realimentada con el fin de reducir el error y tener en la salida del sistema un valor deseado.

La Figura 2.3 ilustra los elementos básicos que forman un sistema de control realimentado.

Figura 2.3 Diagrama de un sistema de control realimentado



Fuente: (Salvetti, 2012)

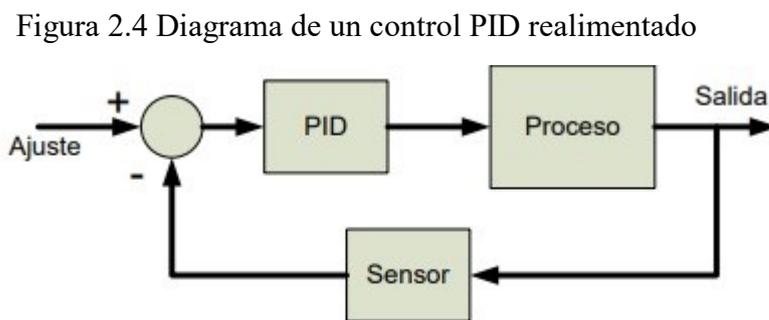
- **Elemento de comparación:** El elemento compara la referencia de la variable controlada con el valor obtenido en la salida, la cual produce una señal de error que es la diferencia del valor de salida y el valor requerido.
- **Elemento de control:** El elemento toma la acción adecuada cuando recibe la señal de error.
- **Elemento de corrección:** El elemento produce un cambio en el proceso para eliminar el error y obtener una salida deseada.
- **Elemento de proceso:** Planta o sistema que controla la variable.

- **Elemento de medición:** El elemento proporciona una señal relacionada con la variable controlada que genera una señal de realimentación al elemento de comparación y determinar si hay error o no.

2.4 Controlador PID

La sintonización de un controlador PID consiste en ajustar sus coeficientes de ganancia proporcional K_p , tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d para lograr un comportamiento del sistema de control acorde a un desempeño establecido a cumplir. (Alberto, 2011)

La Figura 2.4 ilustra los elementos que conforman un PID.



Fuente: (Alberto, 2011)

Un controlador PID es aplicado de forma general en la mayoría de los sistemas de control. Se tiene en cuenta que si se conoce el modelamiento matemático de la planta es más útil aplicar el controlador PID con reglas de sintonización que se ajustan a una aplicación dedicada.

2.5 Lógica Difusa

La lógica difusa o lógica borrosa comprende más allá de enunciados que contienen en su estructura el término verdadero o falso de la lógica convencional, en las aplicaciones de la lógica difusa se tiene enunciados con una connotación de incertidumbre y dentro de la verdad se asocia a grados de veracidad o falsedad, los sistemas de control con lógica difusa combinan variables de entrada definidas en conjuntos difusos que a partir de reglas de inferencia proporcionan uno o varios valores de salida. (Luna, 2002)

La Figura 2.5 ilustra un diagrama basado en la técnica de lógica difusa.

Figura 2.5 Diagrama de bloques lógica difusa



Elaborado por: Edison Espinoza

Los conjuntos difusos representan el grado de pertenencia de un objeto a su conjunto universo o si pertenece o no al conjunto dado, con todas las similitudes de un evento con respecto a otro evento de esta manera los grados de pertenencia son valor de 1 si pertenece al conjunto o valor 0 no pertenece al conjunto. La lógica difusa se utiliza en sistemas para la ayuda de toma de decisiones, permite obtener decisiones con valores incompletos o información incierta.

2.6 Interface Humano Máquina - HMI

El concepto de Interface Humano Máquina (sus siglas en inglés HMI) es la conexión o interfaz que permite interactuar entre humano y máquina, proporcionando la información necesaria para que el usuario cumpla con las tareas del sistema interactivo (software o hardware).

El software permite la comunicación directamente con los dispositivos externos en tiempo real, obteniendo de las máquinas gráficas del proceso, registro real e histórico de datos y manejo de alarmas. (Punzenberger, 2018)

La Figura 2.6 muestra la interface humano máquina.

Figura 2.6 Panel HMI



Fuente: (Siemens, 2018)

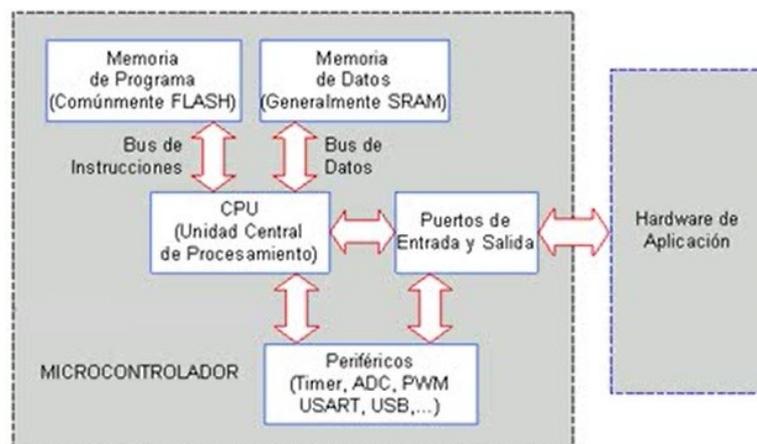
2.7 Microcontrolador

Los microcontroladores están infiltrados en cada uno de los campos de la vida moderna desde pasatiempos hasta la industria, está compuesto de tres bloques funcionales en la cual cada uno cumple una tarea específica.

- Unidad central de procesamiento (CPU)
- Memoria
- Periféricos de entrada y salida

La Figura 2.7 detalla los bloques funcionales de un microcontrolador

Figura 2.7 Bloques funcionales microcontrolador



Fuente: (Pérez, 2016)

Un microcontrolador es un solo circuito integrado que contiene todos los elementos electrónicos que se utilizan para hacer funcionar un sistema basado en un microprocesador; es decir contiene en un solo circuito integrado la unidad de proceso, memoria RAM, memoria ROM, puertos de entrada y salida, el microcontrolador es capaz de ejecutar las instrucciones u órdenes grabadas en su memoria. (Pérez, 2016)

2.8 Aplicaciones en proyectos similares para control de nivel

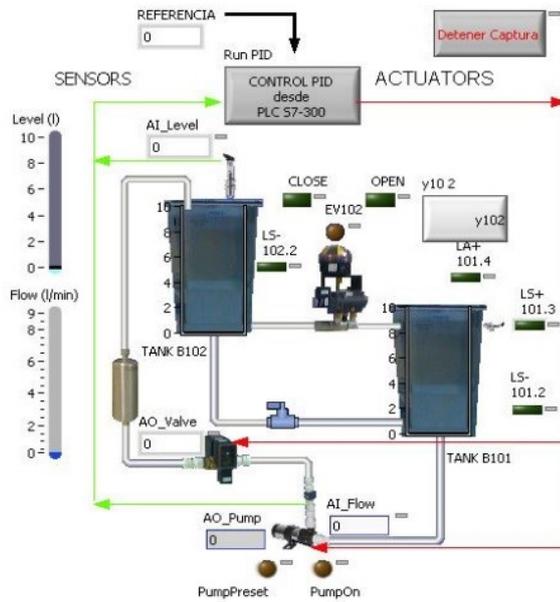
Los módulos didácticos para sistemas de control clásico y moderno ayudan a los estudiantes de ingeniería a aplicar de forma práctica los conceptos de los tipos de control. Mediante este proyecto se considera utilizar los sistemas desde el más básico ON/OFF control PID y control difuso para nivel y caudal de líquidos en un módulo de tanques. Para la elaboración del presente proyecto se han tomado en consideración ejemplos prácticos de control de nivel y caudal de líquidos en los cuales se aplican sistemas de control difuso y PID.

2.8.1 Aplicación 1

Un ejemplo práctico es la implementación y análisis para el control industrial de nivel de tanques con fluidos basado en lógica difusa desarrollado por Gary Ampuño, Wilton Agila, Holger Cevallos en el año 2014 en Guayaquil Ecuador, utilizaron el algoritmo de lógica difusa con conjuntos de múltiples entradas y salidas con el fin de obtener un sistema de control que mejore el rendimiento de velocidad y apertura de una bomba.

El trabajo propone un sistema de control de nivel a través de conjuntos y reglas que ofrece la lógica difusa, las cuales se basan en las características del proceso obteniendo una mejor exactitud de la respuesta de los actuadores a ser controlados, los resultados obtenidos fueron evaluar el desempeño del sistema de control propuesto con un PID. Como se observa en la Figura 2.8

Figura 2.8 Sistema de control PID



Fuente: (Ampuño, 2014)

2.8.2 Aplicación 2

La plataforma de entrenamiento para el control de procesos continuos tipo industrial desarrollado por Danilo Amaya junto con el MSc. William Montalvo en el año 2015 en la Universidad Politécnica Salesiana. La plataforma está integrada por instrumentos nivel y temperatura, con PLC para controlar las variables del proceso. Las pruebas de funcionamiento y calibración de los instrumentos fueron aspectos básicos en la instrumentación, control y redes industriales en este proyecto. Y permite al usuario realizar pruebas de calibración y funcionamiento de los variables de control, como si se lo realizara en la industria. Se observa en la Figura 2.9.

Figura 2.9 Plataforma de procesos continuos

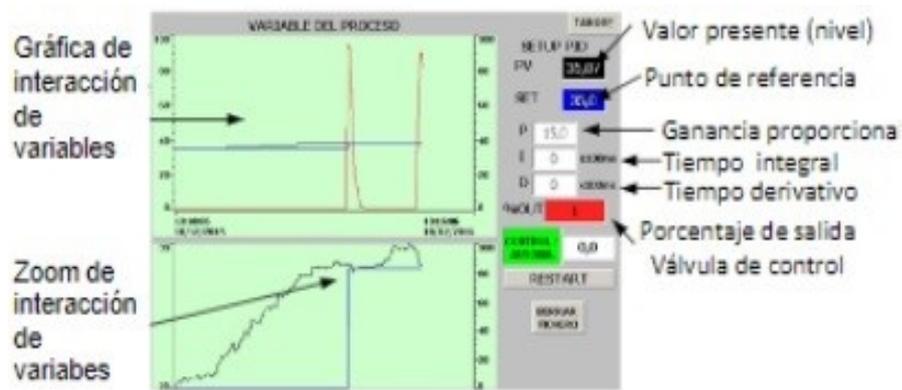


Fuente: (Danilo & Ing William, 2015)

2.8.3 Aplicación 3

El siguiente ejemplo, es la implementación de un control de nivel PID utilizando un PLC S7-300, en el trabajo realizado por Armando Mendoza, Nehider Cabrera, Neimir Berdugo, Javier Roldán, Eugenio Yime en el año 2018 en la Universidad Industrial de Santander en Bogotá Colombia, se fueron utilizando parámetros experimentales en el proceso para obtener una respuesta del PID a una entrada tipo escalón, tratando de mantener la variable controlada de nivel cerca del punto de consigna y seguir las pequeñas variaciones del set point con resultados de control en cuanto se demora alcanzar los nuevos puntos de consigna visualizando en tiempo real los cambios de nivel junto con el estado del sensor y apertura de válvulas. La interfaz para resultados se facilita con la combinación de trabajo del PLC S7-300 y el software Simatic-SCADA comparando los valores experimentales y teóricos para determinar las ganancias del controlador PID. Se observa en la Figura 2.10.

Figura 2.10 Interfaz para la implementación de control de nivel



Fuente: (Mendoza, Nehider, Neimir, Javier, & Eugenio, 2018)

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1 Descripción del Hardware

En este proyecto se requiere implementar un control de nivel y caudal para líquidos, en un módulo didáctico que contiene un tanque de reservorio y un tanque principal para realizar el control de nivel mediante la variación de su caudal en el proceso de llenado, en el sistema se aplicará de tres tipos de controladores, Proporcional, PID y Fuzzy manipulando las diferentes variables desde una pantalla principal ubicada en el módulo, visualizando las gráficas de cada tipo de controlador utilizado.

3.1.1 Bomba centrífuga de agua

En el proceso de nivel y caudal, la bomba es indispensable para impulsar el líquido desde el tanque reservorio al tanque principal mediante un caudal adecuado regulado a porcentajes que se toma en cuenta para el llenado en el proceso de control.

Figura 3.1 Bomba centrífuga de Agua



Fuente: (Electromecánica, 2019)

En la Tabla 3.1 se detalla las características de la bomba de Agua marca Leo.

Tabla 3.1 Características Bomba centrífuga

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Caudal Máximo	40 l/min
Corriente Nominal	5 A
H máxima	40 m
Voltaje Nominal	220 V
Potencia Máxima	550 W
Potencia	½ HP

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.2 Sensor de Flujo

El sensor de flujo es un dispositivo que se instala en la línea de la tubería para medir si el líquido está circulando o no por la misma. En la Figura 3.2 se puede observar el sensor de flujo marca Saier.

Figura 3.2 Sensor de Flujo Saier



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.2 se detalla las características del sensor de flujo.

Tabla 3.2 Características Sensor de flujo Saier

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	SEN-HZ21WA
Rango	1 a 30 L/min
Presión	1,75 MPa
Material	Nylon

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.3 Válvula de bola de latón motorizada

La válvula de bola de latón motorizada permite el control de cierre y apertura de la en un rango de 5 a 15 segundos para el paso del fluido, una vez en la posición adecuada se detiene automáticamente usando energía. En la Figura 3.3 se puede observar la válvula de bola de latón.

Figura 3.3 Válvula motorizada TM-MOC



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.3 se detalla las características de la válvula motorizada.

Tabla 3.3 Características válvula motorizada TM-MOC

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	TK-260
Tamaño	½" DN15
Material	Latón
Tensión	220 AC
Presión Nominal	1,6 MPa
Abrir/Cerrar	5-15 s

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.4 Servo digital JX

El servo digital tiene incorporado un microprocesador que controla la señal recibida del receptor manejando el motor del mismo, no poseen núcleo macizo de hierro sino de un tubo de electroimanes que los hacen ligeros y poca inercia volviéndolos muy rápidos. En la Figura 3.4 se puede observar el servo digital JX5521.

Figura 3.4 Servo Digital JX5521



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.4 se detalla las características del servo digital.

Tabla 3.4 Características Servo digital JK5521

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	JX5521
Velocidad	0,18sec/180°
Voltaje	4,8 – 6 VDC
Engranajes	Aluminio
Peso	55,6 gr
Material	pdi 5521mg servo

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.5 Pantalla Nextion

La pantalla Nextion es la interfaz humano máquina para control, ingreso de variables por medio del touch panel y visualización del proceso a implementarse en el módulo didáctico de nivel y caudal de líquidos. En la Figura 3.5 se puede observar la pantalla Nextion de 7 pulgadas.

Figura 3.5 Pantalla Nextion NX8048T070



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.5 se detalla las características de la pantalla Nextion.

Tabla 3.5 Características pantalla NX8048T070

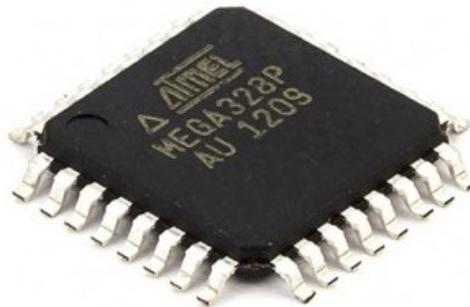
CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	NX8048T070
Tamaño	7,0"
Touch panel	Resistivo
Resolución	800*480
Color	65536
RAM(Byte)	3584
FLASH(MB)	16

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.6 Microcontrolador smd AT-MEGA 328

Se utiliza el microcontrolador At-Mega 328 por su versatilidad y alto desempeño con característica RISC (De sus siglas en inglés Computer with Set of Reduced Instructions) que permite la segmentación y paralelismo en la ejecución de instrucciones, además utiliza el ambiente de Arduino para su programación. En la Figura 3.6 se puede observar el microcontrolador 328.

Figura 3.6 Microcontrolador AT-MEGA 328



Fuente: (Mechatronics, 2019)

En la Tabla 3.6 se detalla las características del microcontrolador.

Tabla 3.6 Características microcontrolador At-mega 328

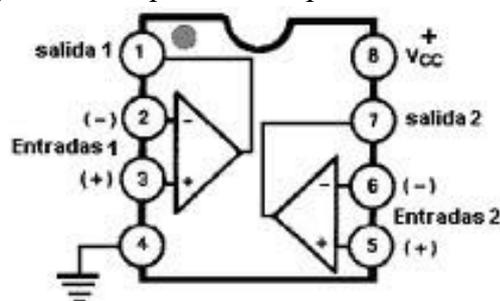
CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Microcontrolador	8 bit
Memoria flash	32 kb
Memoria EEPROM	1 kb
Memoria RAM	2 kb
Frecuencia	20 MHz
Entradas Analógicas	6
Entrada/Salida	23 líneas
Material	Aluminio

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.7 Amplificador operacional LM 358

El amplificador operacional cumple la función de amplificar una entrada de voltaje tipo diferencial, mediante un filtro pasa bajos conversión de Modulación por ancho de pulso - PWM a voltaje para obtener una salida amplificada con acondicionamiento de señal. En la Figura 3.7 se puede observar la configuración del integrado LM358.

Figura 3.7 Amplificador Operacional LM 358



Fuente: (EcuRed, 2012)

En la Tabla 3.7 se detalla las características eléctricas del integrado LM358.

Tabla 3.7 Características Amplificador Operacional LM358

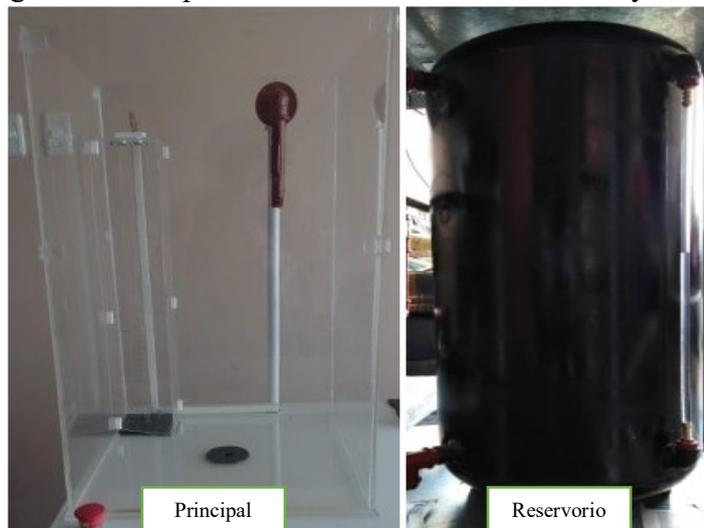
CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Ganancia	100 dB
Entrada de Voltaje	3,0 - 32 v
Rango de temperatura	0 a 70°
Ancho de Banda	1,2 MHz
Corriente de alimentación	300 μ A
Corriente de salida	30 mA

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.8 Tanque principal y reservorio

El funcionamiento de los tanques influye en el proceso para el sistema de circulación del líquido por medio de tubería plástica de $\frac{1}{2}$ pulgada, desde el tanque reservorio hacia el tanque principal, acorde con la cantidad que se necesita llenar el principal para el control de nivel y caudal. En la Figura 3.8 se puede observar los tanques del módulo didáctico.

Figura 3.8 Tanques del módulo didáctico de nivel y caudal



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.8 se detalla las características de los tanques:

Tabla 3.8 Características de los tanques del módulo didáctico

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Tanque Principal	
Altura	500 mm
Ancho A	400 mm
Ancho B	400 mm
Material	Acrílico
Volumen	82 litros
Tanque Secundario	
Altura	650 mm
Diámetro	400 mm
Material	Acero
Volumen	80 litros

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.9 Variador de Frecuencia Delta VFD007EL11A

El variador de frecuencia permite realizar el control de la bomba de agua gracias a su fácil configuración y operación, se considera un variador de 1 HP por las características de la bomba que posee un consumo de 0,5 HP. En la Figura 3.9 se puede observar el variador Delta VFD007EL11A.

Figura 3.9 Variador VFD007EL11A



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.9 se detalla las características eléctricas del Variador Delta.

Tabla 3.9 Características Variador Delta Electronics

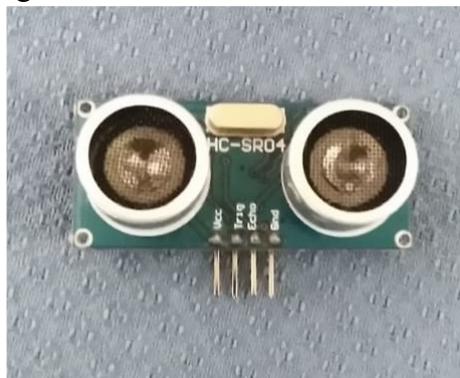
CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	VFD007EL11A
Voltaje de Entrada	100-120VAC
Frecuencia	50/60 Hz
Amperaje	18,0 A
Voltaje de Salida	0-240VAC
Rango de Frecuencia	0,1-600 Hz
Potencia	0,75 kW/1HP
Amperaje	4,2 A

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.10 Sensor de Nivel HC-SR04

El sensor de nivel ultrasónico impermeable se adapta a las características del tanque de medición, se selecciona este tipo de sensor por su tamaño pequeño, consumo energético bajo, buena precisión y resistencia al agua. En la Figura 3.10 se puede observar el sensor de nivel.

Figura 3.10 Sensor de Nivel HC-SR04



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.10 se detalla las características del Sensor de Nivel SR04T.

Tabla 3.10 Características sensor de nivel SR04T

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	HC-SR04
Voltaje de Operación	5 VDC
Frecuencia de emisión	40 KHz
Corriente de Trabajo	15 mA
Rango de medición	2cm a 400 cm
Apertura del pulso ultrasónico	15°
Duración pulso de disparo	10 uS
Tiempo de espera entre medidas	20 mS

Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.11 Breaker principal termo magnético

El elemento proporciona la energía eléctrica al tablero principal y también la protección al variador de frecuencia frente a cualquier eventualidad en la energía eléctrica. En la Figura 3.11 se puede observar el Breaker termo magnético.

Figura 3.11 Breaker termo magnético



Elaborado por: Edison Espinoza

3.1.12 Fuente de alimentación continua formato industrial

La fuente de alimentación proporcionará energía a los circuitos electrónicos que necesitan de tensión continua para su funcionamiento en el módulo didáctico, En la Figura 3.12 se puede observar la fuente de voltaje.

Figura 3.12 Fuente de voltaje continuo



Elaborado por: Edison Espinoza

En la Tabla 3.11 se detalla las características de la fuente de Alimentación VDC.

Tabla 3.11 Descripción Fuente de Alimentación VDC

PINES	DESCRIPCIÓN
Voltaje Entrada	120-240VAC
Frecuencia	60Hz
Voltaje Salida	12VDC
Amperios	5A
Dimensiones	160x98x40mm

Elaborado por: Edison Espinoza

3.2 Diseño de la Estructura

3.2.1 Tanque principal de medición y reservorio de agua

Para el tanque de medición junto con las medidas del tanque reservorio se realizaron los siguientes cálculos para encontrar el volumen de cada uno y que tenga relación la cantidad de líquido en cada tanque.

- Volumen del Cubo (Tanque de medición):

$$\begin{aligned}
 V &= l^2 \times h \\
 V &= 40^2 \times 50 = 80.000cm^3 \\
 80.000cm^3 \times \frac{1l}{1000cm^3} &= 80 l
 \end{aligned}
 \tag{Ec.(3.2)}$$

Donde:

Altura= 50 cm, lado A= 40 cm, lado B= 40 cm

h = Altura del cubo.

l = lado del cubo.

- Volumen del cilindro (Tanque reservorio):

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad \text{Ec.(3.3)}$$

$$V = \pi \times 20^2 \times 65 = 81681 \text{ cm}^3$$

$$81681 \text{ cm}^3 \times \frac{1l}{1000 \text{ cm}^3} = 82 \text{ l}$$

Donde:

$$\varnothing = 40 \text{ cm}, r = 20 \text{ cm}, h = 65 \text{ cm}$$

\varnothing = Diámetro del cilindro.

r = radio del cilindro.

h = Altura del cilindro

Como se observa en las ecuaciones, hay una diferencia de 2 litros del tanque reservorio con el tanque principal de medición lo que se consideraría como adecuada para realizar el control de nivel y caudal en el módulo.

3.2.3 La servo válvula

Para el diseño de la servo válvula se toma como base la válvula de latón motorizada y el servo digital, estos dos elementos forman el conjunto de la servo válvula. Unidos por el diseño de un sistema reductor, un piñón de 14 dientes y un engranaje de 24 dientes.

El sistema por módulo utilizado permite elaborar un piñón recto conociendo el número de dientes N y el módulo M, que es la relación que existe entre el número de dientes del piñón y su diámetro primitivo. Para el diseño del piñón y engranaje se va a encontrar el diámetro primitivo, el diámetro exterior y la altura del diente.

En el primer piñón se toma como referencia el diámetro exterior del piñón original, la medida que va de diente a diente del piñón es de 16 milímetros.

Piñón de 14 dientes sistema reductor 2:1

$$M = \frac{De}{(N + 2)} = \frac{16}{14 + 2} = \frac{16}{16} = 1 \quad \text{Ec.(3.4)}$$

Donde:

De = Diámetro exterior

N = Número de dientes

M = Módulo

La altura del diente es la profundidad del diente medida desde la periferia del diámetro exterior del engranaje.

$$H_1 = 2,167 \times (M) \quad \text{Ec. (3.5)}$$

$$H_1 = 2,167 \times (1) = 2,167$$

H = Altura del diente

Diámetro primitivo y Diámetro exterior.

$$Dp_1 = M \times N \quad \text{Ec.(3.6)}$$

$$Dp_2 = 1 \times 14 = 14 \text{ mm}$$

$$D_e = Dp_2 + (2 \times (M))$$

$$D_e = 14 + (2 \times (1)) = 16 \text{ mm}$$

Piñón de 24 dientes sistema reductor 2:1

Diámetro primitivo y diámetro exterior.

$$Dp_2 = M \times N \quad \text{Ec.(3.7)}$$

$$Dp_2 = 1 \times 24 = 24 \text{ mm}$$

$$D_e = Dp_2 + (2 \times (M))$$

$$D_e = 24 + (2 \times (1)) = 26 \text{ mm}$$

Donde:

Dp = Diámetro primitivo

D_e = Diámetro exterior

Con estos valores calculados se encuentra la distancia entre centro y centro de dos elementos que engranan entre sí y viene dada por:

$$D_c = (Dp_1 + Dp_2)/2 \quad \text{Ec.(3.8)}$$
$$D_c = \frac{14 + 24}{2} = 19 \text{ mm}$$

Donde:

D_c = Distancia entre centros

Con la obtención de los cálculos se realiza las impresiones del engranaje y piñón en 3D por el sistema de Modelado por Deposición Fundida - FDM, que se utiliza con termoplásticos de ingeniería para elaborar piezas resistentes, duraderas y dimensionalmente estables, en la Figura 3.13 se puede observar las impresiones del engranaje y piñón de la servo válvula, considerando que el piñón es la rueda más pequeña de un par de ruedas dentadas.

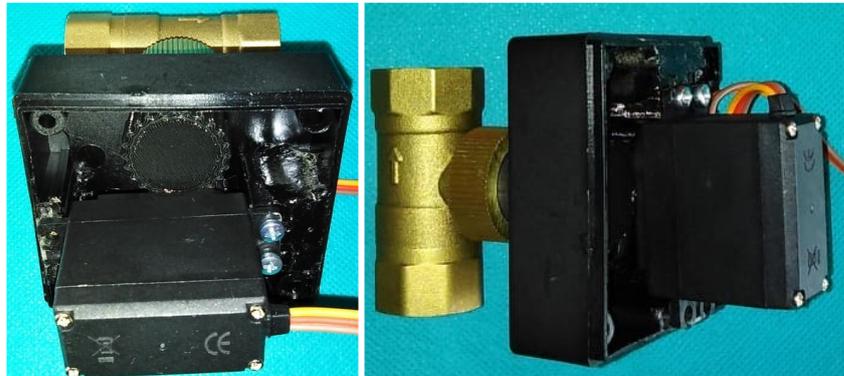
Figura 3.13 Impresiones 3D del Engranaje y piñón para la servo válvula



Elaborado por: Edison Espinoza

Como resultado final se tiene el acople entre los engranajes, el servo digital y la válvula de latón motorizada para formar la servo válvula que permitirá tener control de cierre y apertura de caudal de agua en el sistema de tanques, en la Figura 3.14 se puede observar el acople de los elementos constitutivos de la servo válvula.

Figura 3.14 Acople de servo válvula

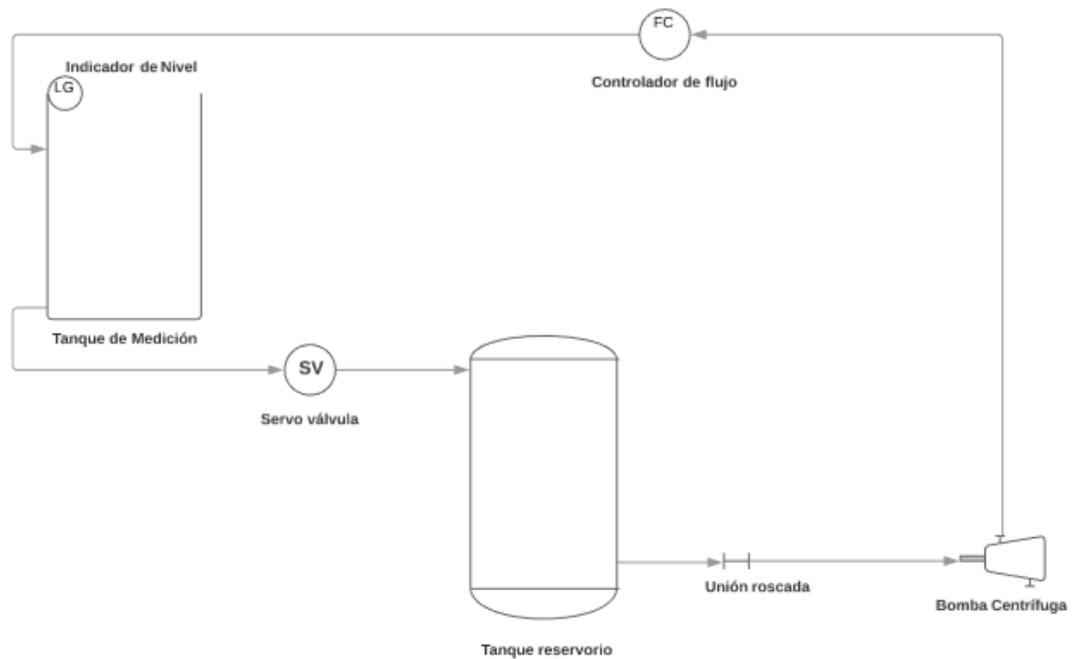


Elaborado por: Edison Espinoza

3.2.4 Diagrama P&ID

La variable caudal es importante en el proceso de control de nivel, ya que permite regular la cantidad de líquido que pasa por la tubería al cierre y apertura en diferentes porcentajes de la servo válvula conectada, que recibe el caudal de retorno desde el tanque principal en caída libre hacia el tanque reservorio, se consideró tubería plástica de media pulgada en el diseño de circulación del líquido para el proceso de la planta, en la Figura 3.15 se puede observar el diagrama de tubería y elementos constituyentes.

Figura 3.15 Diagrama P&ID



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.12 Descripción de elementos Diagrama P&ID

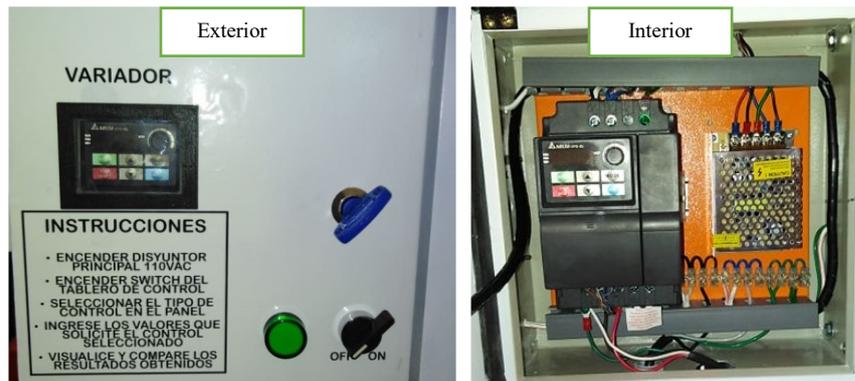
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Tanque de medición	Capacidad 80 litros
Tanque reservorio	Capacidad 82 litros
Bomba centrífuga	Elemento para transportar el agua del tanque reservorio al tanque de medición
Controlador de flujo	Control de la cantidad de líquido circulante por la tubería
Indicador de Nivel	Regla en centímetros para el nivel de Agua
Servo válvula	Control de retorno del líquido al tanque reservorio

Elaborado por: Edison Espinoza

3.2.5 Diagrama del tablero de control

El diagrama eléctrico de control se presenta en el Anexo 1, como están constituidas las conexiones eléctricas de los elementos que conforman el tablero eléctrico, el cual se encuentra ubicado en la base de la estructura del módulo didáctico, en la Figura 3.16 se puede observar la ubicación del tablero interior y exterior.

Figura 3.16 Tablero de control vista exterior e interior

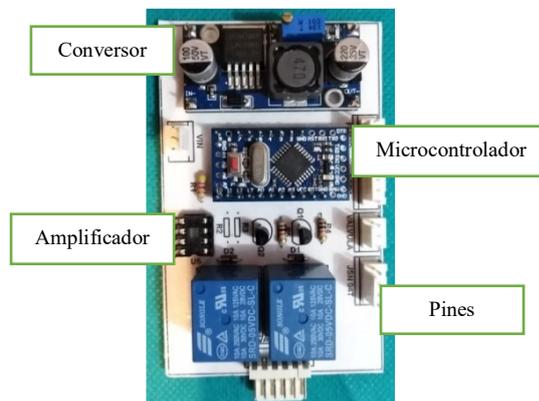


Elaborado por: Edison Espinoza

3.2.6 Diseño de la tarjeta de control

En el diseño de la tarjeta de control se implementa en el PCB (se muestra los esquemáticos realizados en Proteus en el Anexo 3) los elementos electrónicos y pines de conexión necesarios para su funcionamiento, el amplificador operacional realiza la conversión de PWM a voltaje mediante un filtro Pasa bajos que mientras más ancha sea la onda de PWM mayor será el voltaje, el conversor VDC-VDC es para bajar el voltaje de entrada 12 V a 5 V para el microcontrolador, control de Servo válvula, amplificador operacional y sensores que a través de su transductor acoplado funcionan directamente con la tarjeta de control, los relés ayudan en la señal de activación para el variador de frecuencia.

Figura 3.17 Tarjeta de control



Elaborado por: Edison Espinoza

3.3 Descripción del Software

3.3.1 Sistema de control propuesto

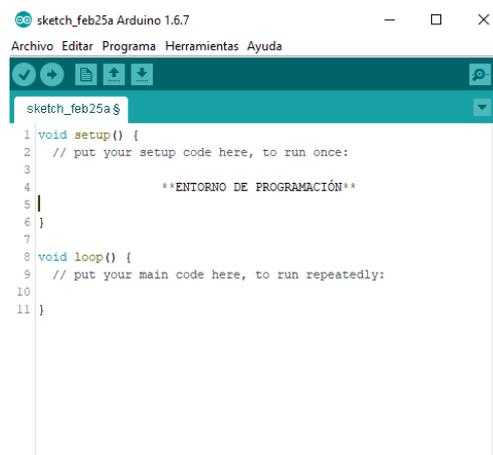
En el proceso intervienen los elementos de acuerdo a la pirámide automatización, en el primer nivel se encuentra el panel de control o pantalla principal HMI, el operador ingresa los datos de set point para nivel y caudal de acuerdo al sistema de control.

En el segundo nivel se encuentra el microcontrolador At-Mega 328 SMD de sus palabras en inglés Surface Mount Device con la programación para cada sistema de control propuesto, y finalmente el tercer nivel con los sensores y actuadores que intervienen en el módulo de nivel y caudal de líquidos.

3.3.2 IDE de Arduino

El entorno de desarrollo integrado de Arduino es una plataforma de código abierto basada en hardware y software, proporciona servicios integrales para el programador con librerías de funcionalidad específicas para facilitar su uso en la creación y diseño de proyectos basados en código o lenguaje de programación C++, en la Figura 3.18 se puede observar el IDE de Arduino para código abierto.

Figura 3.18 Entorno de programación Arduino



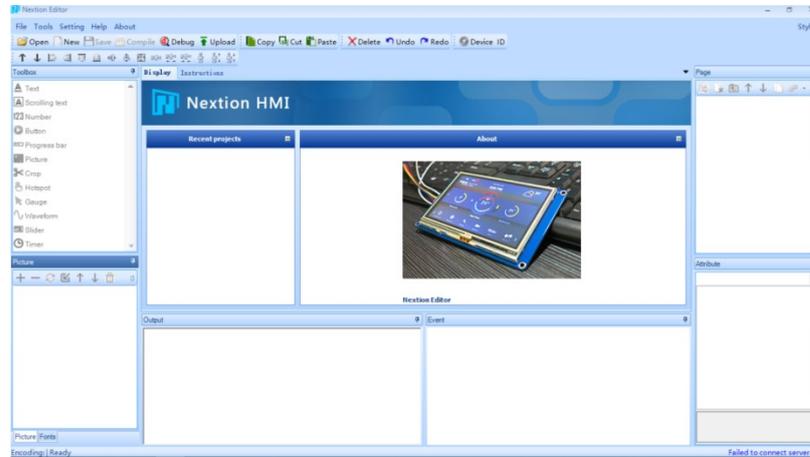
Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.3 Nextion editor software

La plataforma Nextion provee un software integrado de desarrollo para pantallas de la misma marca con fácil configuración Plug and Play, satisface los requerimientos con las diferentes componentes para arrastrar y soltar como gráficos, texto, botones,

barras etc. Posee comunicación serial proporcionando una interfaz de control y visualización entre humano y máquina, en la Figura 3.19 se puede observar el software de edición Nextion.

Figura 3.19 Entorno de programación Nextion



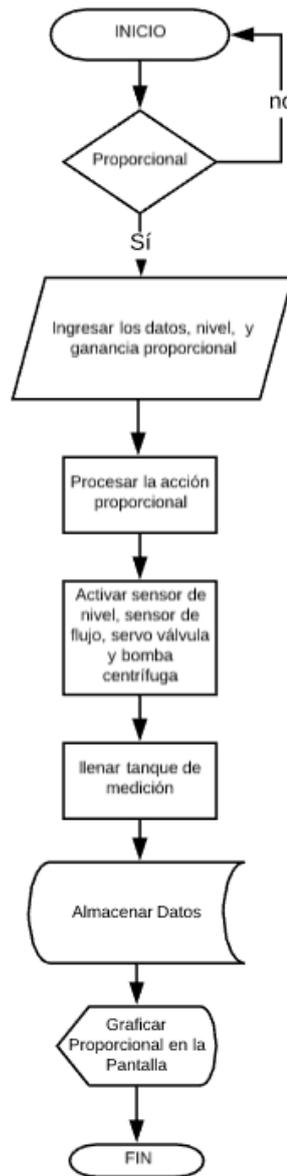
Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.4 Diagrama de flujo algoritmo de control proporcional

El control proporcional mantendrá una relación entre la salida del sistema y el error, definiendo como error a la diferencia entre el valor medido o real con la consigna o variable controlada del sistema o proceso, para la ecuación proporcional se toma en cuenta la variable nivel de agua, la velocidad del variador para el flujo de llenado dando como resultado la gráfica del algoritmo proporcional.

La Figura 3.20, indica el flujograma de programación del algoritmo proporcional implementando.

Figura 3.20 Diagrama algoritmo proporcional



Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.5 Diagrama del flujo algoritmo del control PID

El controlador PID tiene tres parámetros de control, ganancia proporcional, constante integral y constante derivativa, se aplica la ecuación del algoritmo utilizando la librería PID, la variable flujo interviene en el lazo de control de medición de nivel utilizado. Al seleccionar como consigna o set point, este valor de nivel se compara con el valor real de la planta obteniendo la señal de error que es utilizado por las tres constantes del controlador que se encuentran en el programa realizado en Arduino.

En este controlador se debe tener en cuenta que en cualquier instante se puede variar el set point y los parámetros de control para observar cómo va actuando el proceso y generando en la pantalla principal la gráfica resultante gobernante de controlador PID en la planta.

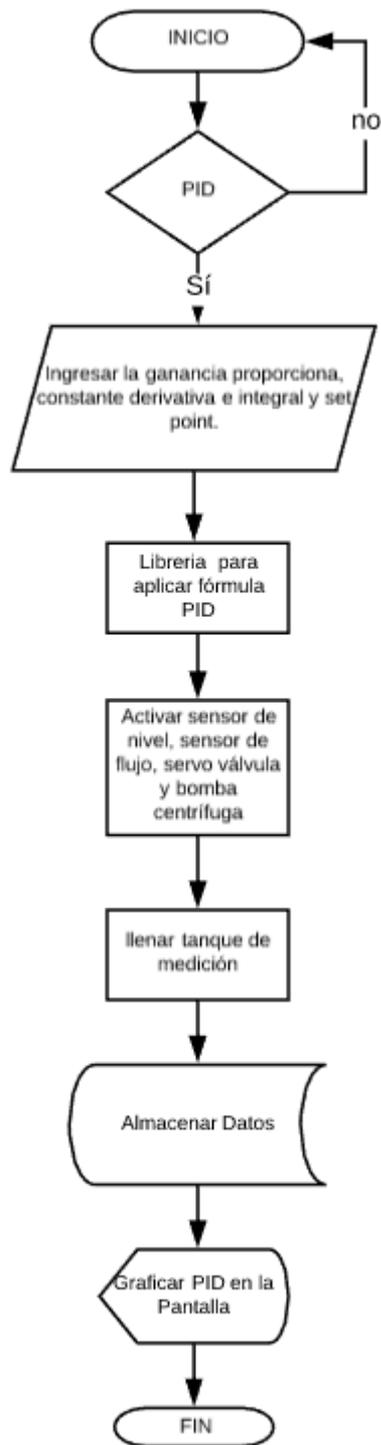
Tabla 3.13 Acciones de las constantes del PID

CONSTANTE	DESCRIPCIÓN
K_p = Ganancia proporcional	$K_{pequeña}$ = acción proporcional pequeña
	K_{grande} = acción proporcional grande
T_i = constante integral	T_i pequeña = acción integral grande
	T_i grande = acción integral pequeña
T_d = constante derivativa	T_d pequeña = acción derivativa pequeña
	T_d grande = acción derivativa grande

Elaborado por: Edison Espinoza

La Figura 3.21, indica el flujograma de programación del algoritmo PID

Figura 3.21 Diagrama algoritmo PID

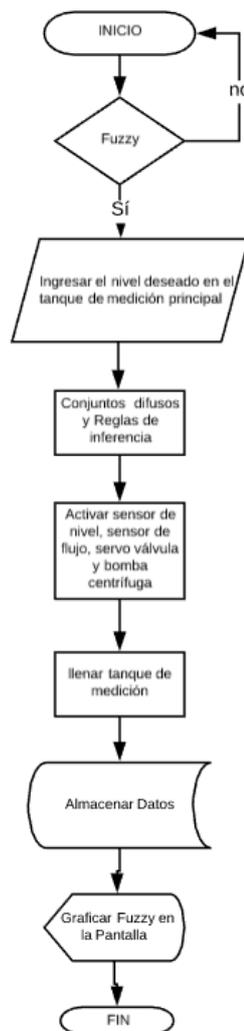


Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.6 Diagrama de flujo algoritmo de control Fuzzy

El algoritmo de control difuso va a encontrar la manera lógica de lograr el objetivo de control en el proceso, haciendo que el sistema trabaje con información que no es exacta convirtiendo la magnitud de la señal en una cantidad difusa. En este caso las variables lingüísticas son el error como entrada y el voltaje al motor como salida para cada conjunto difuso, al realizar las funciones de membresía esto permitirá formular las reglas de control que dirigirá el sistema propuesto por medio del método de inferencia dando como resultado la gráfica de control fuzzy en la pantalla del panel principal del panel. En la Figura 3.22 se observa el flujograma de programación del algoritmo difuso.

Figura 3.22 Diagrama algoritmo fuzzy



Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.7 Programación del Microcontrolador

La programación del Microcontrolador en el software Arduino 1.8.8 se muestra en el Anexo 2, donde se realiza el control de nivel y caudal por medio de los algoritmos de control, la lectura de los datos ingresados y aplicación de las librerías para cada proceso; En el caso de la pantalla Nextion se configura con Arduino por comunicación serial RS-232 definiendo al puerto COM que estará conectado la tarjeta para recibir y transmitir datos, la velocidad de comunicación debe estar en la misma configuración de la placa Arduino.

3.3.8 Interfaz de Usuario

Para poder apreciar y seleccionar cada algoritmo de control se ha implementado una interfaz para el usuario donde puede visualizar el entorno de presentación y selección del funcionamiento para el control de nivel y caudal en el módulo didáctico.

Figura 3.23 Interfaz de Usuario



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.14 Descripción Interfaz Usuario

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Pantalla 1	Presentación
Pantalla 2	Tipos de control
Pestaña PRO	Selección para abrir el entorno del algoritmo proporcional
Pestaña PID	Selección para abrir el entorno del algoritmo PID
Pestaña Fuzzy	Selección para abrir el entorno del algoritmo Fuzzy

Elaborado por: Edison Espinoza

Cada algoritmo tendrá la visualización de la gráfica del control seleccionado a través de los parámetros que solicite el sistema y de esta manera iniciar el funcionamiento del módulo, el ambiente de presentación HMI se puede observar en la Figura 3.23

3.3.9 Interfaz control proporcional

En el control proporcional por medio del panel HMI el usuario ingresa los valores de setpoint y la variable K_p , con estos valores el programa realiza el control comparando el valor medido o real con la consigna o setpoint inicializado por el usuario haciendo más rápida la salida del sistema y a su vez visualizar la gráfica proporcional del sistema de tanques, como se observa en la Figura 3.24.

Figura 3.24 Selección Algoritmo proporcional



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.15 Descripción pantalla algoritmo Proporcional

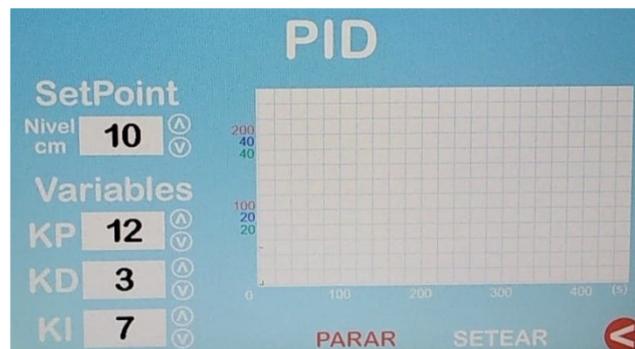
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Set-point	Se ingresa el nivel deseado en el control de nivel proporcional
KP	Variable de ganancia para ajuste del control proporcional
Cuadrícula	Visualización de la señal de control
INICIAR/PARAR	Comienza o detiene el proceso de control en el módulo
<	Retorno a la pantalla de tipos de control
SETEAR	Limpia la pantalla para iniciar otro proceso

Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.10 Interfaz control PID

Al seleccionar el controlador PID en el panel, este incorpora las tres constantes proporcional, integral y derivativa, que son los valores de K_p , K_d y K_i , en el sistema o planta el valor de nivel de agua deseado es proporcionado por el sensor de nivel representando el punto actual del proceso o sistema, el programa realizará las acciones de control ingresando una señal externa que es el valor que se desea alcanzar, esta señal recibe el nombre de consigna o setpoint, el controlador resta la señal de punto actual con la de consigna para obtener el valor de error determinando en cada instante, esta es la diferencia entre el valor deseado y el valor medido, el error es utilizado por cada constante del controlador para combinar las señales sumadas y obtener la gráfica resultante gobernante del módulo como se observa en la Figura 3.25.

Figura 3.25 Selección Algoritmo PID



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.16 Descripción pantalla algoritmo PID

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Set-point	Se ingresa el nivel deseado en el control de nivel PID
KP,KD,KI	Variables de ganancia proporcional, constante derivativa y constante integral para ajuste del PID
Cuadrícula	Visualización de la señal de control
INICIAR/PARAR	Comienza o detiene el proceso de control en el módulo
<	Retorno a la pantalla de tipos de control
SETEAR	Limpia la pantalla para iniciar otro proceso

Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.11 Interfaz control Fuzzy

En el controlador difuso se tiene la variable de entrada que es el error con su universo de discurso que va de 0 cm a 45 cm en relación con la regla del tanque de medición y la salida que es la señal de voltaje al motor desde la tarjeta de control que va de 0 VDC a 10 VDC , al tener claro cuáles son entradas y salidas se procede a realizar las variables lingüísticas para conjunto difuso compuesto por funciones triangulares y trapezoidales, después se definirá las reglas de control con cada función de membresía para el sistema, teniendo estos elementos definidos ingresan al monitor de inferencia que es el algoritmo que realiza en este caso el programa en Arduino para inferir en una conclusión a partir de las premisas que son las entradas y reglas de control.

Para cada función de membresía se tienen 5 términos lingüísticos:

Tabla 3.17 Funciones de Membresía Fuzzy

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	
Nivel Entrada	Voltaje Salida
NP(nivel pequeño)	VP (voltaje pequeño)
NG (nivel grande)	VG (voltaje grande)
NM (nivel medio)	VM (voltaje medio)
NP(nivel pequeño)	VP (voltaje pequeño)
NG(nivel grande)	VG (voltaje grande)

Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.18 Reglas de Control

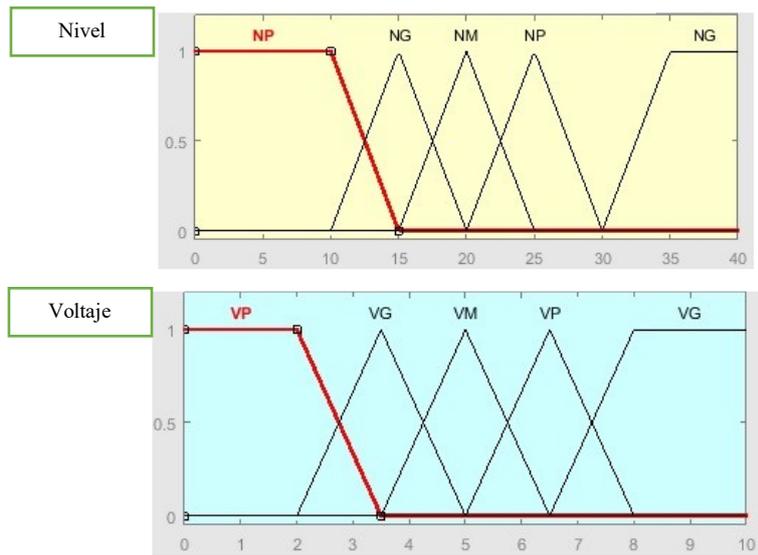
Error	Voltaje
NP	VP
NG	VG
NM	VM
NP	VP
NG	VG

Elaborado por: Edison Espinoza

- Si el nivel es pequeño, entonces el Voltaje es pequeño
- Si el nivel es grande, entonces el voltaje es grande
- Si el nivel es medio, entonces el voltaje es medio
- Si el nivel es pequeño, entonces el voltaje es pequeño
- Si el nivel es grande, entonces el voltaje es grande

El siguiente paso es tomar los conjuntos fusificados en el monitor de inferencia para convertirlos en una cantidad certera de acción de señal adecuada al proceso para modular o compensar los errores del sistema. Como paso final la señal desfusificada queda acondicionada para trabajar con el actuador cumpliendo todos los pasos del controlador difuso y obtener la gráfica resultante Fuzzy.

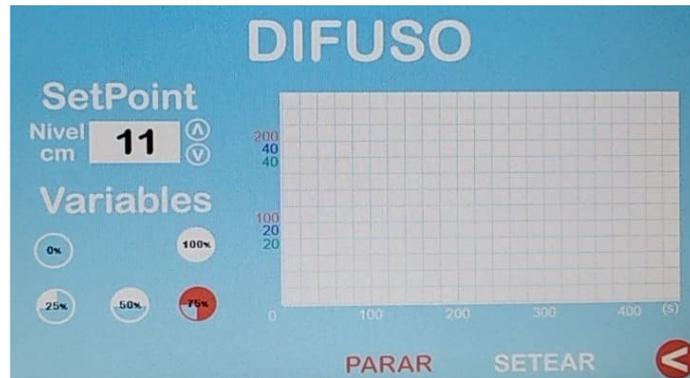
Figura 3.26 Conjuntos Difusos para Nivel y Voltaje



Elaborado por: Edison Espinoza

Se utilizó la herramienta de Matlab “fuzzyLogicDesigner” para la elaboración de los conjuntos difusos en este caso para el error un universo de discurso con valores enteros para el error de 0 cm a 40 cm y para el voltaje de 0VDC a 10VDC.

Figura 3.27 Selección Algoritmo Fuzzy



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.19 Descripción pantalla algoritmo Fuzzy

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Set-point	Se ingresa el nivel deseado en el control de nivel Fuzzy
Variables	Selección de perturbación Apertura de la servo válvula a diferentes porcentajes
Cuadrícula	Visualización de la señal de control
INICIAR/PARAR	Comienza o detiene el proceso de control en el módulo
<	Retorno a la pantalla de tipos de control
SETEAR	Limpia la pantalla para iniciar otro proceso

Elaborado por: Edison Espinoza

3.3.12 Interface Humano Máquina principal

En este entorno al iniciar el módulo didáctico se visualizan los tres tipos de algoritmos de control con los que puede trabajar la planta, al seleccionar algún tipo de pestaña direcciona al ambiente de trabajo de cada proceso con sus diferentes requerimientos de trabajo.

Figura 3.28 HMI principal Tipos de Control



Elaborado por: Edison Espinoza

Tabla 3.20 Descripción HMI Tipos de Control

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Pantalla	Tipos de control
Pestaña PRO	Selección para abrir el entorno del algoritmo proporcional
Pestaña PID	Selección para abrir el entorno del algoritmo PID
Pestaña Fuzzy	Selección para abrir el entorno del algoritmo Fuzzy

Elaborado por: Edison Espinoza

CAPITULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Descripción del funcionamiento del Módulo

Al momento de realizar las pruebas en el módulo se debe tomar en cuenta que todos los elementos no tengan ningún tipo de daños y que el tanque de medición se encuentre en condiciones óptimas para el llenado, también verificar el nivel de agua del tanque reservorio que contenga más de la mitad de su capacidad total que es 82 litros en este caso 41 a 50 litros es adecuado para su funcionamiento el nivel del tanque reservorio se muestra en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Nivel del tanque reservorio a 41 litros



Elaborado por: Edison Espinoza

Después de tener el tanque reservorio con la cantidad necesaria de agua se continúa probando cada elemento controlado desde un programa cargado en la pantalla Nextion para la servoválvula, bomba centrífuga, sensor de flujo, sensor de nivel y variador delta del motor, todo en conjunto en funcionamiento desde la tarjeta de control. El proceso lo que hace es activar cada elemento utilizando una señal de voltaje para la prueba, pulso de ON/OFF para activar la bomba y que empiece el proceso de llenado de agua al tanque de medición, junto con el control de flujo deseado y cantidad de llenado en el tanque.

Figura 4.2 Prueba de elementos del Módulo desde pantalla Nextion

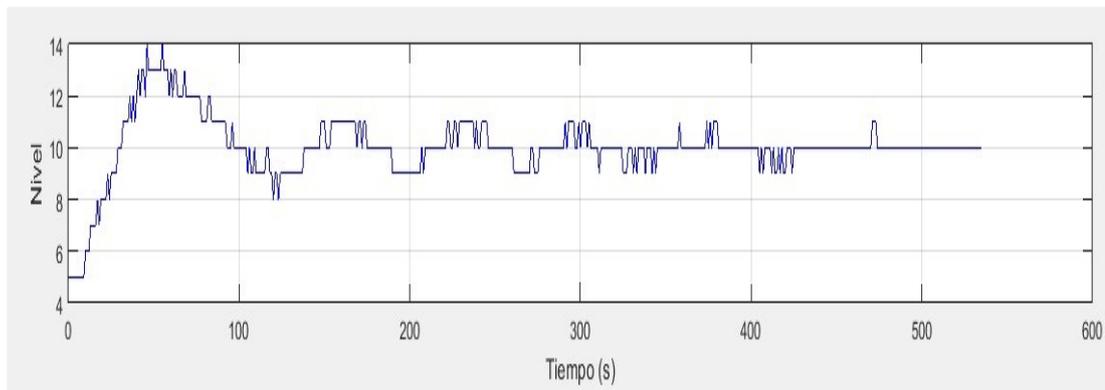


Elaborado por: Edison Espinoza

4.2 Resultado de la función de transferencia

Como primer paso para estimar la función de transferencia de control del módulo se tomaron rangos de valores entre el nivel y voltaje de control de la bomba, importando los datos a la función `ident` en el dominio del tiempo en Matlab. Mediante la función `ident` se toma los datos desde Excel que permite obtener el modelo de función de transferencia. En la Figura 4.3 se observa el nivel y el tiempo de respuesta hasta llegar a tener un estado estable de la señal

Figura 4.3 Función de transferencia desde el software Matlab



Elaborado por: Edison Espinoza

Con este procedimiento se obtuvo un resultado cercano al 82% como estimación de la función de transferencia dado por la siguiente función.

$$G_s = \frac{32,95}{191,09 s + 1} \quad \text{Ec.(3.9)}$$

Para realizar las pruebas del algoritmo proporcional y PID se toma un set-point de 10cm de altura de nivel a diferentes rangos de variables para cada algoritmo.

4.3 Resultado del algoritmo proporcional

La prueba de funcionamiento del control proporcional consiste en ingresar un valor de nivel y la constante proporcional K_p , y mostrar en el panel principal como se genera la gráfica con el tiempo en el cual alcanza el valor de nivel deseado, en esta prueba se pudo observar que la mejor señal para llegar al set point esta al ingresar valores K_p mayores a 20 de ganancia como se observa en la Figura 4.4.

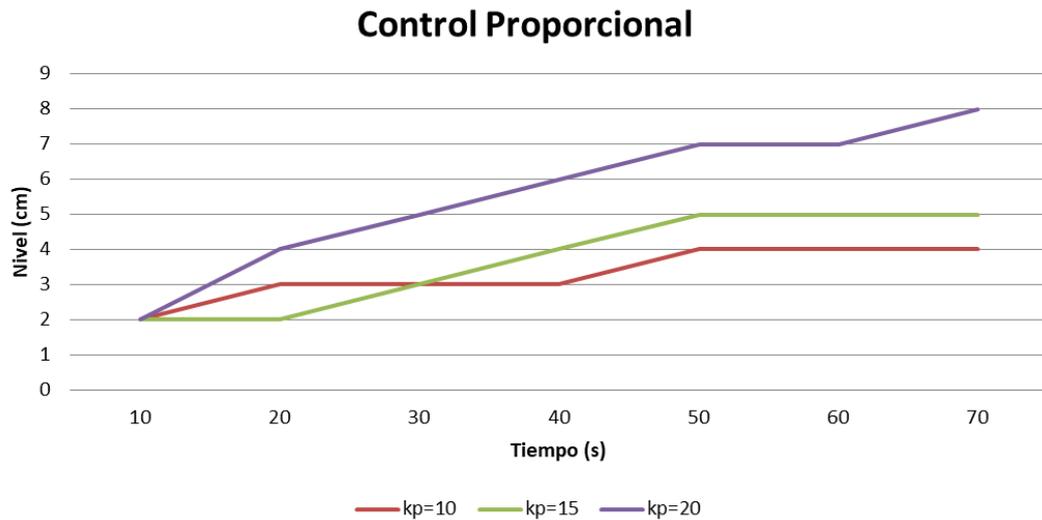
Tabla 4.1 Pruebas control proporcional

Set-point= 10 cm	NIVEL (cm)		
	$K_p=10$	$K_p=15$	$K_p=20$
Tiempo (s)			
10	2	2	2
20	3	2	4
30	3	3	5
40	3	4	6
50	4	5	6
60	4	5	6
70	4	5	8

Elaborado por: Edison Espinoza

En la tabla se encuentran los valores ingresados como nivel y constante proporcional, y los tiempos que se genera en qué valor de nivel se encuentra en ese instante en el tanque principal hasta alcanzar el valor requerido de nivel.

Figura 4.4 Prueba algoritmo proporcional



Elaborado por: Edison Espinoza

La gráfica detalla el control proporcional de la señal de salida a la variación de la constante K_p , en la cual aumentar la acción proporcional tiene la consecuencia de aumentar la velocidad de respuesta del sistema, disminuir el error en régimen permanente y aumentar la inestabilidad del sistema, este último punto de inestabilidad negativo se puede corregir encontrando un punto de valor de K_p en el cual se genere respuesta rápida del sistema disminución, del error sin que el sistema sea demasiado inestable.

Con un $K_p = 10$ el sistema apenas alcanza un valor de 4 cm de nivel con un error de 6 cm, en cambio con un $K_p = 20$ el sistema llega a 8 cm de nivel disminuyendo el error a 2 cm, en este caso aumentado el valor de K_p el sistema podría alcanzar el valor deseado disminuir el error, pero la inestabilidad hará que tarde mucho en establecer su estado final.

4.4 Resultado del algoritmo PID

En la prueba de funcionamiento del control PID se realiza la sintonización de forma manual en consideración de qué efectos tiene variar los parámetros del PID con la constante K_p de control tratar de reducir el error del sistema, con la acción derivativa K_i disminuir un poco la velocidad del sistema pero aumentar la estabilidad del sistema deseado, al llegar a este punto donde el sistema es rápido y estable pero todavía mantiene un error en régimen permanente utilizamos la acción integral para

minimizar el error con la rapidez deseada. Con estas consideraciones se pudo acatar que la mejor señal de control para llegar al set point de 10cm de nivel son las variables del PID 3 que tiene mejor sintonización para estabilizar la señal del controlador para el nivel deseado en la planta como se observa en la Figura 4.5.

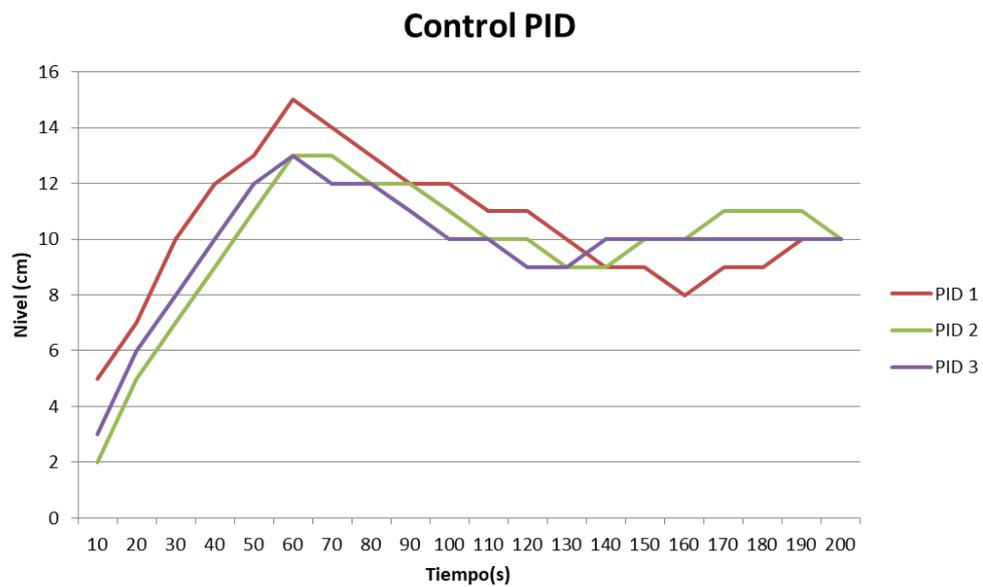
Tabla 4.2 Pruebas control PID

Set-point = 10 cm	NIVEL (cm)		
	PID 1	PID 2	PID 3
	Kp=10, Kd=8, Ki=2	Kp=4, Kd=0, Ki=5	Kp=12 Kd=3 Ki=5
10	5	2	3
20	7	5	6
30	10	7	8
40	12	9	10
50	13	11	12
60	15	13	13
70	14	13	12
80	13	12	12
90	12	12	11
100	12	11	10
110	11	10	10
120	11	10	9
130	10	9	9
140	9	9	10
150	9	10	10
160	8	10	10
170	9	11	10
180	9	11	10
190	10	11	10
200	10	10	10

Elaborado por: Edison Espinoza

En la tabla se encuentran los valores ingresados de nivel, ganancia proporcional, constante derivativa y constante integral con los tiempos que muestra en qué valor de nivel se encuentra en ese instante con acción del PID, hasta alcanzar el valor requerido de nivel en el tanque principal.

Figura 4.5 Prueba Algoritmo PID



Elaborado por: Edison Espinoza

La gráfica detalla el funcionamiento del algoritmo PID, en este caso los valores de sintonización del PID 3 ayuda al sistema con menor sobre amortiguamiento, alcanzar el tiempo de establecimiento en velocidad y error para el sistema. Lo que se estima que el PID está sintonizado en tener la respuesta deseada, hay que considerar que la respuesta en un sistema real existen limitaciones que reducen la acción de respuesta del controlador para obtener una respuesta deseada, en este caso por más que aumentemos la acción proporcional llegará un punto en que el accionador se satura y no dará más de sí.

4.5 Resultado del algoritmo Fuzzy

La prueba de funcionamiento del control Fuzzy consiste en tener la servo válvula abierta a diferentes porcentajes como perturbación de retorno del líquido al tanque de reserva y verificar como se realiza la fusificación de la señal por medio de las funciones de membresía estipuladas en la programación, para alcanzar el nivel deseado como set point en el panel, en esta prueba se pudo examinar que la mejor señal de control para llegar al set point de 10cm de nivel es cuando el programa realiza el algoritmo difuso por el método de inferencia a una apertura de la servo válvula del 75% para estabilizar la señal del controlador como se observa en la Figura 4.6.

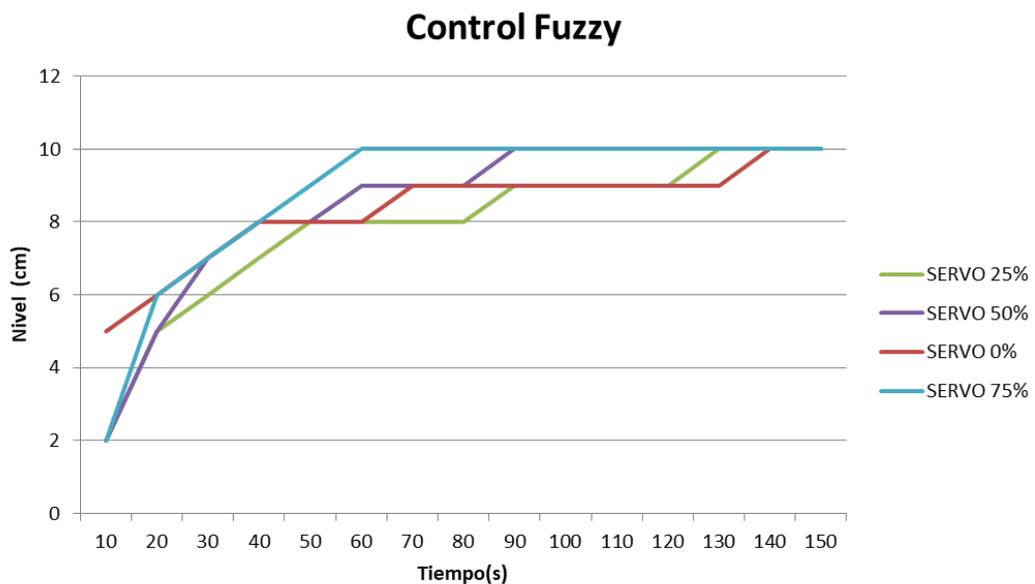
Tabla 4.3 Pruebas control Fuzzy

Set-Point =10cm	NIVEL (cm)			
	Tiempo (s)	Servo 0%	Servo 25%	Servo 50%
10	5	2	2	2
20	6	5	5	6
30	7	6	7	7
40	8	7	8	8
50	8	8	8	9
60	8	8	9	10
70	9	8	9	10
80	9	8	9	10
90	9	9	10	10
100	9	9	10	10
110	9	9	10	10
120	9	9	10	10
130	9	10	10	10
140	10	10	10	10
150	10	10	10	10

Elaborado por: Edison Espinoza

La tabla identifica el valor ingresado de nivel y los porcentajes de apertura de la servo válvula, en línea con los tiempos que muestra en qué valor de nivel se encuentra en ese instante en el tanque principal hasta alcanzar el valor requerido de set point.

Figura 4.6 Prueba Algoritmo Fuzzy



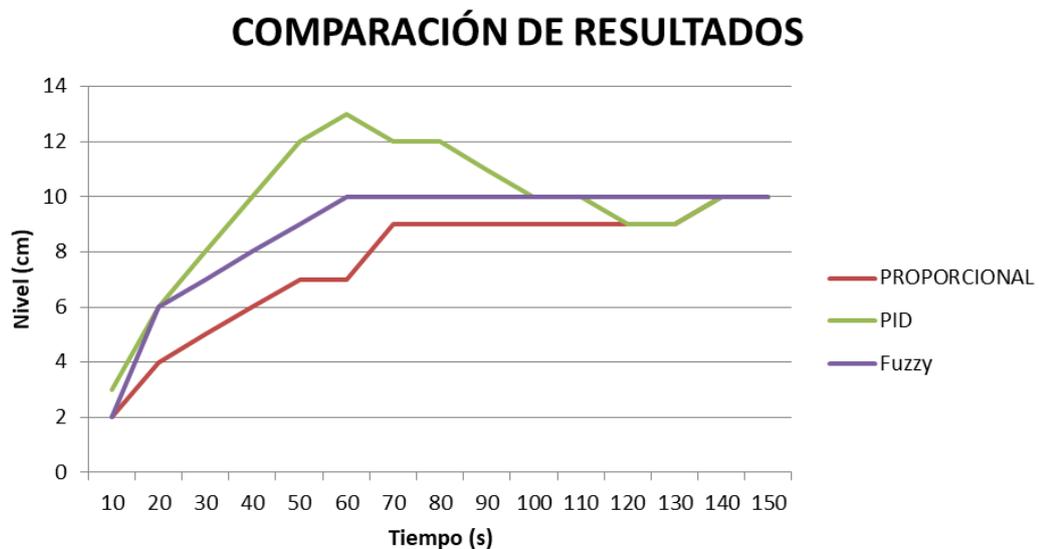
Elaborado por: Edison Espinoza

La gráfica del control Fuzzy indica las señales generadas a diferentes perturbaciones de la servo válvula, obteniendo como mejor resultado con una apertura del 75% en la cual llega a estabilizar la señal en el nivel deseado a los 60s donde se mantiene constante.

4.6 Análisis y comparación de resultados de los algoritmos de control

En la comparación de resultados se toma como criterio verificar con que algoritmo trabaja de manera adecuada la planta de control de nivel, en este caso cada algoritmo muestra tiempos de respuesta considerados razonables con variaciones de error no mayores a 2cm para alcanzar el set-point deseado en régimen permanente.

Figura 4.7 Comparación de Señales de control



Elaborado por: Edison Espinoza

La gráfica muestra la señal más óptima en la prueba de cada algoritmo aplicado con tiempos de respuesta considerados adecuados para la estabilización de la señal del sistema donde se encuentra el PID a los 90s, Proporcional a los 140s y Fuzzy con 60s de respuesta.

Tabla 4.4 Análisis y comparación de Pruebas

Set-Point =10cm	NIVEL (cm)		
	Proporcional	PID	Fuzzy
10	2	3	2
20	4	6	6
30	5	8	7
40	6	10	8
50	7	12	9
60	7	13	10
70	9	12	10
80	9	12	10
90	9	11	10
100	9	10	10
110	9	10	10
120	9	9	10
130	9	9	10
140	10	10	10
150	10	10	10

Elaborado por: Edison Espinoza

Los algoritmos que se desarrollaron en el módulo didáctico se adecuaron al sistema donde se tiene una función de transferencia de primer orden obtenida en Matlab, y por medio de las pruebas de cada control lograr el objetivo que tiene el proyecto verificar el nivel a un caudal ingresado desde la bomba centrífuga modificando las variables para cada algoritmo Proporcional, PID y Fuzzy, se puede considerar que el de mejor respuesta para esta planta es el algoritmo PID por tener las 3 variables K_p , K_i , K_d simultáneas de realimentación en el proceso de control de nivel para alcanzar que el PID se encuentre sintonizado acorde al módulo de trabajo. Con la finalidad de verificar que la posición en tiempo real del nivel de la planta sea exactamente a la posición deseada o set-point.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El desarrollo de un módulo didáctico para nivel y caudal de líquidos permitió acoplar una estructura en la cual se instaló dos tanques uno para medición y otro como reservorio de agua, tubería con conexiones adecuadas al proceso, también elementos electrónicos de control como sensores, servoválvula, bomba centrífuga que al interactuar juntos permiten la visualización de un algoritmo en el proceso de control por medio de un HMI para el operador.

La caracterización del módulo permitió conocer elementos que podrían ser reutilizados como tuberías, tanques y estructura metálica para la implementación de la electrónica óptima en el control de nivel y caudal de líquidos, cumpliendo así con las necesidades de funcionamiento y elementos robustos para realizar el proceso de control.

La repotenciación para el nuevo sistema de control tiene elementos con las características necesarias para mayor flexibilidad en cada acción en el proceso de la planta, cumpliendo con las adecuaciones para múltiples aplicaciones futuras de control moderno en el mismo.

Con la implementación de tres algoritmos de control proporcional, PID y Fuzzy en el módulo didáctico se comprobó el funcionamiento de los elementos que interactúan entre sí y a su vez visualizar en el HMI la gráfica gobernante del sistema, modificando los parámetros para cada variable al seleccionar el tipo de control propuesto en el panel principal.

El tanque de medición al ser elaborado en material acrílico se realizó soportes con platinas del mismo material en la mitad y en la parte superior como refuerzo para evitar que con la presión al llenarse de agua el tanque se expanda y se desprege las zonas reforzadas con silicón y pegamento para acrílico.

El módulo didáctico a pesar de no tener las prestaciones adecuadas para tiempos de respuesta más rápidos, tuvo un funcionamiento y trabajo eficiente al proponer estos tipos de algoritmos de control cumpliendo con las pruebas acorde a las variables ingresadas en cada proceso donde se pudo observar el trabajo de la planta.

El mejor algoritmo de control para esta planta se considera el controlador PID por las características y constantes de los tres parámetros ingresados al proceso de la planta que ayudan a los requerimientos del proceso en específico las respuestas de nivel para alcanzar el valor deseado, pero también se toma en consideración que los valores para el control fuzzy pueden ser optimizados para un sobresaliente desempeño en este tipo de control implementado en el módulo didáctico.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda que antes de encender el equipo se lea las instrucciones presentes en el tablero de control para tener conocimiento del voltaje adecuado desde la red eléctrica para el funcionamiento del módulo didáctico.

Antes de empezar a trabajar en el módulo revisar que este no tenga fugas en sus tuberías y tanques por cualquier avería ya que utiliza agua para su proceso de control y cualquier fuga dañaría los componentes eléctricos y electrónicos del equipo.

Se recomienda no dejar que el agua permanezca en el reservorio por mucho tiempo para no generar agua con residuos o suciedad acumulada que pueda dañar el sistema de tubería la bomba centrífuga y elementos de control del módulo.

Utilizar el equipo de forma adecuada y cuidadosa para evitar inconvenientes de daños en los elementos que posee el mismo al momento de realizar las pruebas de trabajo.

Al momento de realizar un mantenimiento ya sea este preventivo o correctivo acudir a personal calificado para la manipulación de los mismos o tener las suficientes herramientas para realizarlo sin inconvenientes.

El módulo didáctico tendría tiempos de respuesta más rápida instalando una tubería del mismo diámetro de salida de la bomba centrífuga que en este caso sería tubería de 1 pulgada de esa manera el llenado sería rápido por mayor flujo circulante.

REFERENCIAS

- Alberto, G. (2011). Controladores PID y Controladores Difusos. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 13.
- AliExpress. (2010). Obtenido de Cámara USB AN-99: <https://es.aliexpress.com/item/2In1-AN99-2MP-5M-Android-USB-Endoscope-HD-Camera-8mm-IP67-Walterproof-Snake-USB-Camera-HD720P/32798460480.html>
- Ampuño, G. A. (2014). Implementación y análisis de rendimiento de un control industrial de nivel para tanques con fluidos, basado en lógica difusa. *MASKANA, Ingeniería*, 10.
- Bravo, L. (14 de Marzo de 2012). *Control I*. Obtenido de <http://leobravocontrol1.blogspot.com/2012/03/que-es-un-sistema-de-control.html>
- Danilo, A., & Ing William, M. (01 de Mayo de 2015). *Diseño y desarrollo de una plataforma de entrenamiento para el control de procesos continuos*. Obtenido de Diseño y desarrollo de una plataforma de entrenamiento para el control de procesos continuos: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10156/1/UPS%20-%20ST001779.pdf>
- EcuRed. (23 de Febrero de 2012). *EcuRed*. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Circuito_integrado_LM358
- Electromecánica, M. (21 de Enero de 2019). *Electromecánica MM*. Obtenido de https://www.electromecanicamm.com.ar/buscador.php?txt_buscar=bomba+leo
- Jiménez, R. F. (2011). *Diseño e implementación de un sistema embebido para la adquisición y transmisión de señales biomédicas a través de la red celular*. Colombia.
- Luna, G. M. (2002). *Introducción a la Logica Difusa Centro de investigación y estudios avanzados México*. México.
- Mechatronics, N. (20 de Enero de 2019). *Naylam Mechatronics*. Obtenido de Naylam Mechatronics: <https://naylampmechatronics.com/atmel/111-atmega328.html>
- Mendoza, A., Nehider, L., Neimir, B., Javier, R., & Eugenio, Y. (14 de Abril de 2018). *Revista UIS Ingenierías*. Obtenido de Revista UIS Ingenierías:

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/6290/8185>

Ogata, K. (2010). Introduccion a los sistemas de control. En *Ingenieria de control moderna* (págs. 1-40). Madrid: Pearson Education.

Pérez, I. R. (2016). *Sistemas Microprocesados*. Quito.

Punzenberger, I. (02 de Enero de 2018). *COPADATA*. Obtenido de <https://www.copadata.com/es/soluciones-hmi-scada/interfaz-hombre-maquina-hmi/>

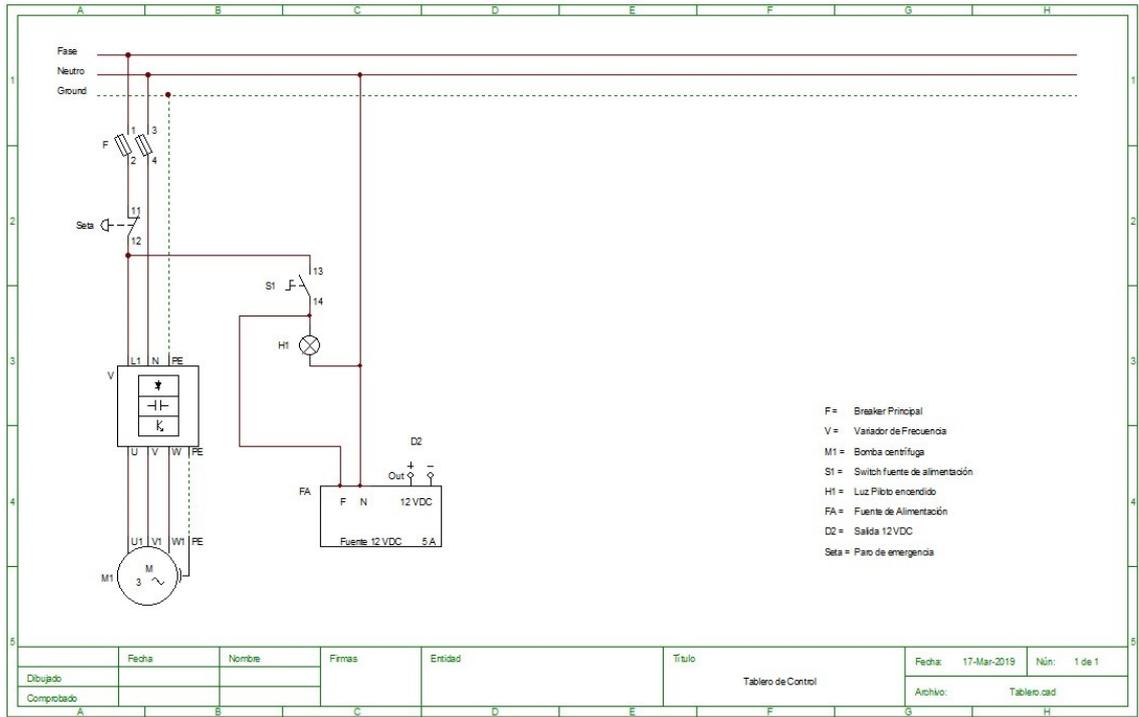
Salvetti, I. D. (23 de Mayo de 2012). *Electrónica Industrial*. Obtenido de <http://eet602ei.blogspot.com/2012/05/sistemas-de-control-lazo-abiertocerrado.html>

Siemens. (02 de Enero de 2018). *Siemens global web site*. Obtenido de https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/hmi/pages/simatichmi_1.aspx

ANEXOS

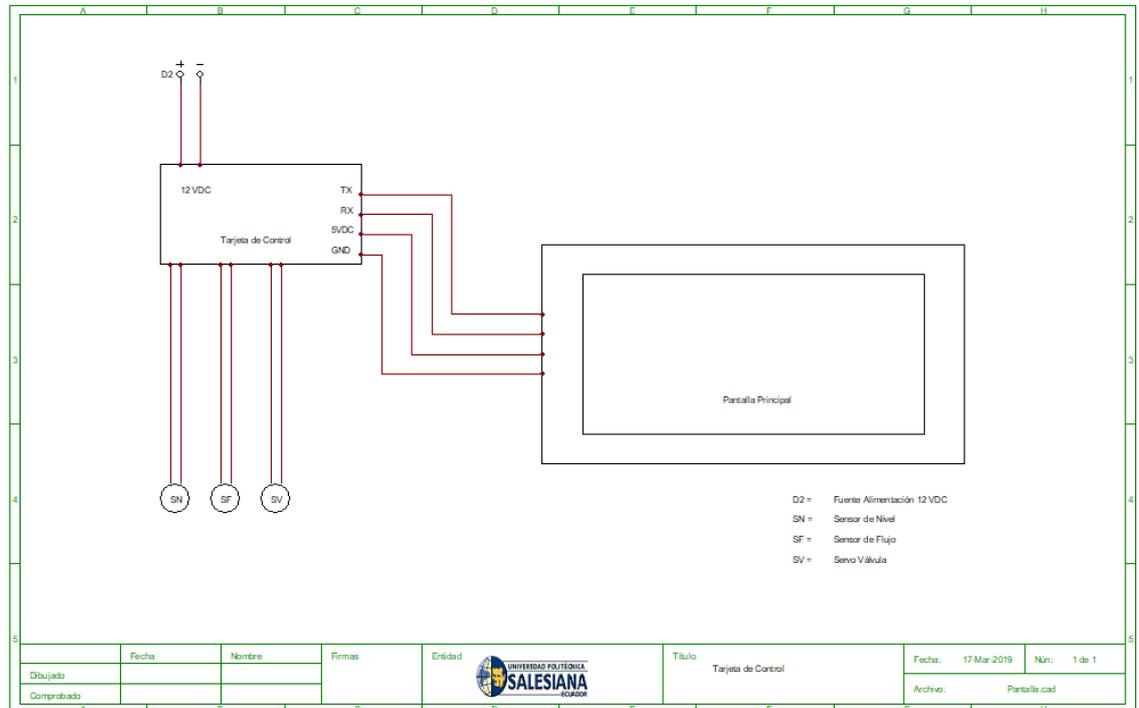
ANEXO 1

Plano Eléctrico tablero de control



Elaborado por: Edison Espinoza

Plano Eléctrico tarjeta de control



Elaborado por: Edison Espinoza

ANEXO 2

Programación del microcontrolador:

```
/******  
Codigo para el trabajo de titulación.  
Se pretende generar diferentes tipos  
de control implementados con el IDE de  
Arduino en un ATmega328 de la familia  
de ATMEL  
*****/  
  
//**** LIBRERIAS ****  
#include <Ultrasonic.h>  
#include <Nextion.h>  
#include <PID_v1.h>  
#include <Servo2.h>  
#include <Fuzzy.h>  
  
//**** PINES ****  
#define TX 3  
#define RX 4  
#define flujo 2 //Pin defenido para el sensor de Flujo  
#define echo 6 //Pines definidos para el sensor Ultrasonico  
#define trig 7  
#define variador A3 //Pin definido para la salida PWM del Variador de frecuencia  
#define valvula 10 //Pin definido para la salida de la Valvula motorizada  
#define pwm 11  
  
//**** COMUNICACION ****  
SoftwareSerial HMIserial(TX, RX); // Nextion TX(B) to pin 2 and RX(Y) to pin 3 of Arduino  
  
//**** Ultrasonido y ServoValvula ****  
Ultrasonic ultrasonic(trig, echo);  
Servo myservo;  
  
//**** Variables PROPORCIONAL ****  
long Ref; //Referencia, también llamado SetPoint  
int Y; //Salida, también llamada Process Variable ó PV  
int error; //Error  
int U; //Señal de control  
long Kpp; //Ganancia proporcional  
uint32_t numero1;  
uint32_t numero2;  
uint32_t numero3;  
  
//**** VARIABLES PID ****  
double Kp = 5, Ki = 3, Kd = 1;  
double Setpoint, Input, Output;  
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);  
  
//**** VARIABLES DIFUSO ****  
Fuzzy *control = new Fuzzy(); //se declara el objeto fuzzy, se llamará, control.  
  
int distancia; //variable donde se guardará la distancia leida por el sensor  
long set_point = 10; //variable desde la que se controla el set point del sistema  
int Error; // Es la resta entre el Set point y la distancia leida por el sensor  
int Potencia; // Variable en la cual se guarda el nivel de potencia del PWM
```

```

//***** VARIABLES SISTEMA *****
int Muestreo = 1000; // tiempo de muestreo Se encuentra en milisegundos
unsigned long pasado = 0; // tiempo pasado (Se hace para asegurar tiempo de muestreo)
unsigned long ahora;

int servo = 0; //variable que almacena el valor en grados de la servo valvula
int caso = 0;
int pruebas;

uint32_t boton5, boton6, boton7;
uint32_t boton0, boton1, boton2, boton3, boton4;

//***** Nextion *****
NexDSButton bt7 = NexDSButton(3, 13, "bt7");
NexDSButton bt6 = NexDSButton(4, 21, "bt6");
NexDSButton bt5 = NexDSButton(5, 14, "bt5");
NexDSButton bt4 = NexDSButton(5, 13, "bt4");
NexDSButton bt3 = NexDSButton(5, 12, "bt3");
NexDSButton bt2 = NexDSButton(5, 11, "bt2");
NexDSButton bt1 = NexDSButton(5, 10, "bt1");
NexDSButton bt0 = NexDSButton(5, 9, "bt0");
NexNumber n0 = NexNumber(3, 2, "n0");
NexNumber n1 = NexNumber(3, 3, "n1");
NexNumber n2 = NexNumber(5, 7, "n2");
NexNumber n3 = NexNumber(4, 5, "n3");
NexNumber n4 = NexNumber(4, 6, "n4");
NexNumber n5 = NexNumber(4, 11, "n5");
NexNumber n6 = NexNumber(4, 14, "n6");
NexWaveform s0 = NexWaveform(3, 15, "s0");
NexWaveform s1 = NexWaveform(4, 23, "s1");
NexWaveform s2 = NexWaveform(5, 16, "s2");

char buffer[100] = {0};
NexTouch *botones[] =
{&bt5, &bt6, &bt7, NULL};

void Apro(void *ptr)
{
  Serial.println("proporcional");
  n0.getValue(&Ref);
  n1.getValue(&Kpp);
  caso = 1;
}

void Apid(void *ptr)
{
  uint32_t var, var1, var2, var3;
  Serial.println("pid");
  n3.getValue(&var);
  n4.getValue(&var1);
  n5.getValue(&var2);
  n6.getValue(&var3);
  Setpoint = double(var);
  myPID.SetTunings(double(var1), double(var3), double(var2));
  caso = 2;
}

```

```

void Adif(void *ptr)
{
  uint32_t valor;
  Serial.println("fuzzy");
  n2.getValue(&set_point);
  caso = 3;
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //***** Nextion *****
  nexInit();
  bt7.attachPush(Apro, &bt7);
  bt6.attachPush(Apid, &bt6);
  bt5.attachPush(Adif, &bt5);

  pinMode(flujo, INPUT);

  interrupts(); // Habilito las interrupciones
  Interrupción INTO, llama a la ISR llamada "flujo" en cada flanco de subida en el pin digital 2
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Flujo), flujo, RISING);

  pinMode(trig, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);

  pinMode(pwm, OUTPUT);
  analogWrite(pwm, 0);

  pinMode(variador, OUTPUT);
  digitalWrite(variador, LOW);

  myservo.attach(valvula);
  myservo.write(0);

  //***** PID *****
  //Setpoint = 10;
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(0, 255);

  //***** Difuso *****
  //se declara el universo de entrada
  FuzzyInput*error = new FuzzyInput(1); //el universo de entrada será el error, el error se define como Set Point-Distancia
  //se establecen los conjuntos del universo ERROR con sus respectivas funciones de membresia
  FuzzySet*ENG = new FuzzySet(0, 0, 6, 11); // Error Negativo Grande, trapezoidal
  error->addFuzzySet(ENG); //Se añade el conunto al universo de entrada.
  FuzzySet*ENP = new FuzzySet(6, 11, 11, 22); //Error Negativo pequeño, triangular
  error->addFuzzySet(ENP); //Se añade el conunto al universo de entrada.
  FuzzySet*EC = new FuzzySet(11, 22, 22, 33); //Error cero, trinagular
  error->addFuzzySet(EC); //Se añade el conunto al universo de entrada.
  FuzzySet*EPP = new FuzzySet(22, 33, 33, 38); //Error Positivo Pequeño, triangular.
  error->addFuzzySet(EPP); //Se añade el conunto al universo de entrada.
  FuzzySet*EPG = new FuzzySet(33, 38, 45, 45); //Error Positivo Grande, trapezoidal.
  error->addFuzzySet(EPG); //Se añade el conunto al universo de entrada
  //se agrega al sistema fuzzy el universo con sus conjuntos.
  control->addFuzzyInput(error);

  //se declara la salida del sistema, en este caso será la POTENCIA

```

```

FuzzyOutput*voltaje = new FuzzyOutput(1);
//se crean los conjuntos pertenecientes a este universo, junto a sus funciones de membresia
FuzzySet*VNG = new FuzzySet(0, 0, 32, 64); //Voltaje Negativo pequeño, trapecio.
voltaje->addFuzzySet(VNG); //Se añade el conunto al universo de salida.
FuzzySet*VNP = new FuzzySet(32, 64, 64, 128); //Voltaje Negativo Grande, triangular.
voltaje->addFuzzySet(VNP); //Se añade el conunto al universo de salida.
FuzzySet*VC = new FuzzySet(64, 128, 128, 192); //Voltaje Cero, triangular.
voltaje->addFuzzySet(VC); //Se añade el conunto al universo de salida.
FuzzySet*VPP = new FuzzySet(128, 192, 192, 224); //Voltaje Positivo Pequeño, triangular.
voltaje->addFuzzySet(VPP); //Se añade el conunto al universo de salida.
FuzzySet*VPG = new FuzzySet(192, 224, 255, 255); //Voltaje Positivo Grande, trapezoidal.
voltaje->addFuzzySet(VPG); //Se añade el conunto al universo de salida.
//se agraga el universo de salida con sus conjuntos al sistema Fuzzy
control->addFuzzyOutput(voltaje);

//se establecen las reglas, cada regla debe tener un antecedente,
//una consecuencia y una asignación.

FuzzyRuleAntecedent*siErrorNegativoGrande = new FuzzyRuleAntecedent();
siErrorNegativoGrande->joinSingle(ENG); //Antecedente
FuzzyRuleConsequent*entoncesVoltajeNegativoGrande = new FuzzyRuleConsequent();
entoncesVoltajeNegativoGrande->addOutput(VNG); //Consecuencia
FuzzyRule*regla_1 = new FuzzyRule(1, siErrorNegativoGrande, entoncesVoltajeNegativoGrande);
control->addFuzzyRule(regla_1); //Asignación

FuzzyRuleAntecedent*siErrorNegativoPequeno = new FuzzyRuleAntecedent();
siErrorNegativoPequeno->joinSingle(ENP);
FuzzyRuleConsequent*entoncesVoltajeNegativoPequeno = new FuzzyRuleConsequent();
entoncesVoltajeNegativoPequeno->addOutput(VNP);
FuzzyRule*regla_2 = new FuzzyRule(2, siErrorNegativoPequeno, entoncesVoltajeNegativoPequeno);
control->addFuzzyRule(regla_2);

FuzzyRuleAntecedent*siErrorCero = new FuzzyRuleAntecedent();
siErrorCero->joinSingle(EC);
FuzzyRuleConsequent*entoncesVoltajeCero = new FuzzyRuleConsequent();
entoncesVoltajeCero->addOutput(VC);
FuzzyRule*regla_3 = new FuzzyRule(3, siErrorCero, entoncesVoltajeCero);
control->addFuzzyRule(regla_3);

FuzzyRuleAntecedent*siErrorPositivoPequeno = new FuzzyRuleAntecedent();
siErrorPositivoPequeno->joinSingle(EPP);
FuzzyRuleConsequent*entoncesVoltajePositivoPequeno = new FuzzyRuleConsequent();
entoncesVoltajePositivoPequeno->addOutput(VPP);
FuzzyRule*regla_4 = new FuzzyRule(4, siErrorPositivoPequeno, entoncesVoltajePositivoPequeno);
control->addFuzzyRule(regla_4);

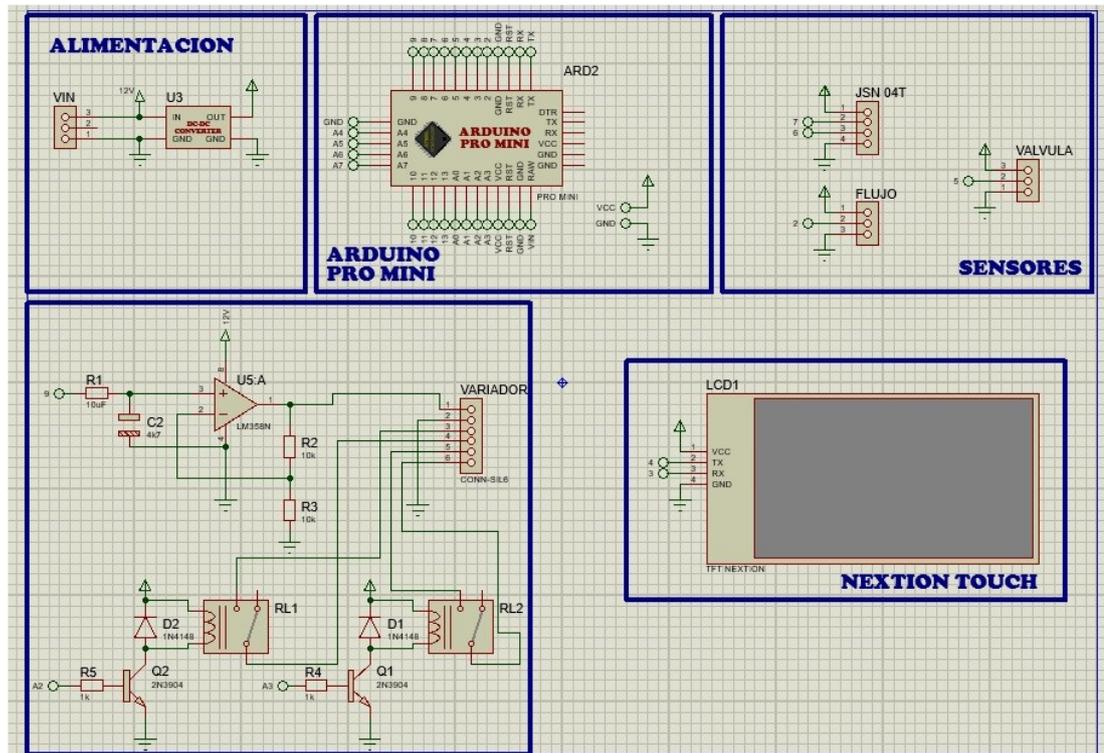
FuzzyRuleAntecedent*siErrorPositivoGrande = new FuzzyRuleAntecedent();
siErrorPositivoGrande->joinSingle(EPG);
FuzzyRuleConsequent*entoncesVoltajePositivoGrande = new FuzzyRuleConsequent();
entoncesVoltajePositivoGrande->addOutput(VPG);
FuzzyRule*regla_5 = new FuzzyRule(5, siErrorPositivoGrande, entoncesVoltajePositivoGrande);
control->addFuzzyRule(regla_5);
}
void loop()
{
    nexLoop(botones);

```

Elaborado por: Edison Espinoza

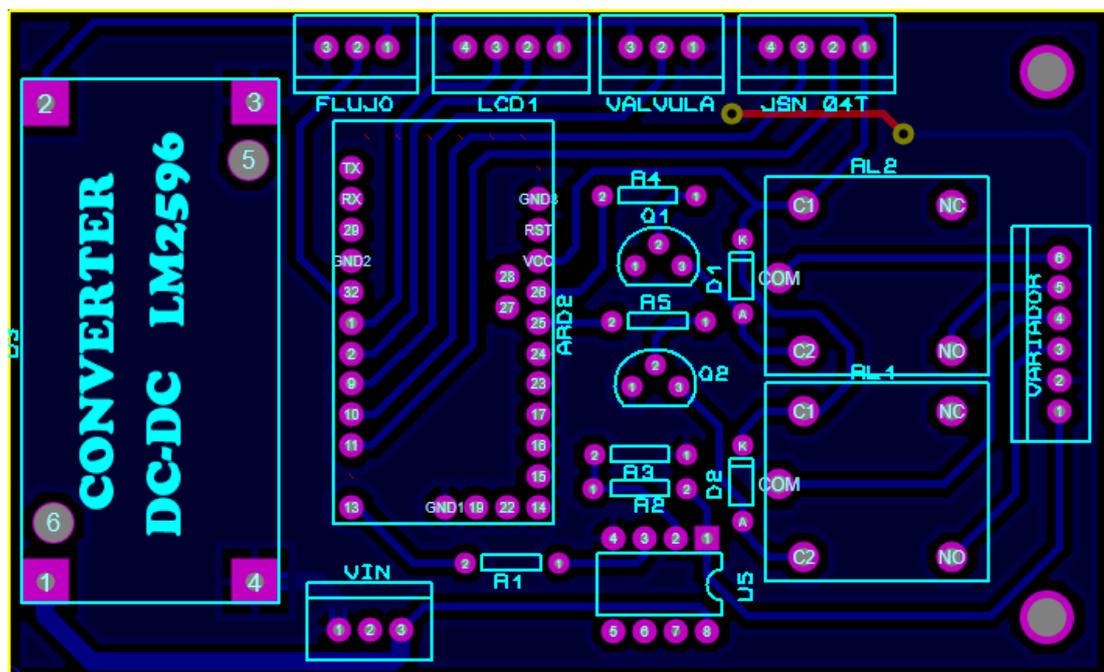
ANEXO 3

Diagrama del Esquemático realizado en Proteus:



Elaborado por: Edison Espinoza

Diagrama del PCB Layout realizado en Proteus:



Elaborado por: Edison Espinoza

ANEXO 4

1. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA:

Control P y PID para el módulo de procesos continuos de nivel y caudal.

b. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un control P y PID para el módulo de procesos continuos de nivel y caudal.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Entender el concepto de lazo cerrado en un sistema de control.
- Entender los conceptos de tiempo de respuesta y estabilidad.
- Comprobar el tiempo de establecimiento de las señales.

2. MARCO TEÓRICO

El análisis de un diseño de sistema de control es definir el comportamiento de la planta ante un estímulo o magnitud física de entrada para obtener una magnitud física de salida.

El control clásico plantea una serie de controladores que generan una señal de control considerando parámetros para su aplicación

Control Proporcional:

El control proporcional es un amplificador de ganancia ajustable que permite tener una ganancia pequeña como respuesta acción proporcional pequeña, una ganancia grande como respuesta acción proporcional grande, sin embargo, estas variaciones pueden hacer el sistema más oscilatorio.

Control PID:

El controlador PID incorpora las tres acciones proporcional, integral, y derivativa en el proceso de una planta utilizando reglas de sintonización dedicadas.

3. MARCO PROCEDIMENTAL

4. Práctica 1.1 Control Proporcional

Siguiendo las instrucciones del tablero de control del módulo didáctico realice el control proporcional de nivel ingresando los valores que solicite el controlador.

Para un Set-point de 10 cm compare las gráficas visualizadas en el HMI para los diferentes K_p de ganancia 10, 15, 20 y registre los valores para los diferentes tiempos en la tabla 1 de cómo se va formando la señal de salida.

Tabla 1 registro de valores control proporcional

Tiempo (s)	$K_p=10$	$K_p=15$	$K_p=20$
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			

Elaborado por: Edison Espinoza

Realice la gráfica de salida del controlador P, que se establezca mejor al Set-point indicado.

Gráfica 1.- control proporcional



Elaborado por: Edison Espinoza

5. Práctica 1.2 Control PID

Siguiendo las instrucciones del tablero de control del módulo didáctico realice el control proporcional de nivel ingresando los valores que solicite el controlador.

Para un Set-point de 10 cm, compare las gráficas visualizadas en el HMI para las diferentes constantes del PID y registre los valores en la tabla 2 de cómo se va formando la salida.

Tabla 2 registro de valores control PID

Set-point= 10 cm			
Tiempo (s)	Kp=10, Kd=8, Ki=2	Kp=4, Kd=0, Ki=5	Kp=12 Kd=3 Ki=5
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			
130			
140			
150			
160			
170			
180			
190			
200			

Elaborado por: Edison Espinoza

Realice la gráfica de salida del controlador PID que se estabilice mejor al Set-point indicado.

Gráfica 2.- control PID



Elaborado por: Edison Espinoza

6. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA:

Control Fuzzy para el módulo de procesos continuos de nivel y caudal.

b. OBJETIVO GENERAL

Realizar el control Fuzzy para el módulo de procesos continuos de nivel y caudal.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Entender el concepto de variable lingüística.
- Entender el trabajo de los conjuntos difusos.
- Comprobar el tiempo de establecimiento de la señal fuzzy.

7. MARCO TEÓRICO

El algoritmo de control difuso va a encontrar la manera lógica de lograr el objetivo de control en el proceso, haciendo que el sistema trabaje con información que no es exacta convirtiendo la magnitud de la señal en una cantidad difusa.

En este caso las variables lingüísticas son el error como entrada y el voltaje al motor como salida para cada conjunto difuso, al realizar las funciones de membresía esto permitirá formular las reglas de control que dirigirá el sistema propuesto por medio del método de inferencia dando como resultado la gráfica de control fuzzy gobernante del sistema.

8. MARCO PROCEDIMENTAL

Práctica 2.1

Siguiendo las instrucciones del tablero de control del módulo didáctico realice el control Fuzzy de nivel ingresando los valores que solicite el controlador.

Para un Set-point de 10 cm compare las gráficas visualizadas en el HMI para las diferentes constantes del Fuzzy y registre los valores en la tabla 3 de cómo se va formando la señal de salida.

Tabla 3 registro de valores control Fuzzy

Set-Point=10				
TIEMPO= (10)	Servo 0%	Servo 25%	Servo 50%	Servo 75%
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				
150				

Elaborado por: Edison Espinoza

Realice la gráfica de salida del controlador Fuzzy que se estabilice mejor al Set-point indicado.

Gráfica 3.- control Fuzzy



Elaborado por: Edison Espinoza