



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO.

**LIZETH YULIANA BLANCO RIOS
WHITNEY DAYANN MORENO SAAVEDRA**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2020

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO.

**LIZETH YULIANA BLANCO RÍOS
WHITNEY DAYANN MORENO SAAVEDRA**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director (a):
INGENIERO MARIO GIOVANNI GARCÍA GÓMEZ

Línea de Investigación:
Control, instrumentación.

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2020

“Este es un logro por el que he trabajado deicidamente por mucho tiempo, pero más que un logro personal es un logro de un conjunto de personas a las que quiero agradecer inmensamente a mis padres en primera fila por ser esas personas que lucharon a mi lado y nunca me dejaron desfallecer a pesar de mis tropiezos, a mis hermanos por sus apoyos y a toda mi familia que me decía que todo lo que me proponía lo podía hacer.

Pero especialmente este proyecto va dedicado a mi mami Guilla que siempre me expreso con gran amor que debía a hacer las cosas por mi y por mi vida, le dedico mi carrera a ella mi angel que me acompaña desde el cielo y me motiva a cada día ser mejor ser humano.”

LIZETH YULIANA BLANCO RIOS

“Este logro va dedicado en primer lugar mi hijo, mis padres y hermanas quienes con su esfuerzo lograron en mí, ese valor para poder afrontar los desafíos que represento el ir por este camino de aprendizaje.

A mi familia en general, quienes siempre estuvieron conmigo en esos momentos de incertidumbre y alegría, acompañándome en este camino de aprendizaje.

Y sobre todo a Dios todo poderoso por darme la fuerza y la sabiduría cada día, dándome la alegría de conocer un nuevo día para poder seguir adelante cumpliendo mis metas.”

WHITNEY DAYANN MORENO SAAVEDRA

Agradecimientos

De primera mano queremos agradecer a Dios, ya que el nos permite cada día llevar con fortalezas todos nuestros objetivos, también a nuestro director de trabajo de grado quien compartió sus conocimientos para nuestra formación, nos dio esa mano de ayuda para lograr llevar a cabo este trabajo de grado.

Damos a nuestra universidad por abrirnos las puertas para brindarnos conocimiento y valores para el día de hoy servir a la sociedad, y a cada uno de nuestros maestros que nos guiaron durante este proceso de enseñanza, crecimiento académico y personal formándonos con grandes valores y conocimientos.

Por último, queremos agradecer a nuestras familias, por darnos esa mano en los momentos de dificultad y cuando no queríamos continuar, siempre con una voz de aliento para poder llegar a culminar este proceso.

Resumen

El presente trabajo de grado tiene como finalidad diseñar y construir una planta de tanques acoplados mediante técnicas de control difuso, para obtener el control y monitoreo de variables que se presentan en este proceso. Este tipo de sistemas de control no convencional son usados actualmente en procesos industriales, redes neuronales, algoritmos genéticos, entre otros, también considerándose como sistemas de control que puedan ser tratados por medio de control tradicional como son los sistemas PID. En este trabajo se seleccionó el manejo de sistemas de control difuso por medio de la herramienta de software de **MATLAB**[®], accediendo a la licencia original del software brindada por la universidad y dándole un buen uso a estas herramientas de beneficios académicos que están al alcance de los estudiantes y docentes de la institución.

Se realizó una comunicación entre el hardware que implica sensores y servoválvulas con el software para poder tener resultados de medida y control, dicha comunicación es efectuada por medio de una tarjeta de adquisición la cual nos permite solamente hacer la comunicación entre el hardware y el software.

Esta planta de control fue diseñada e implementada con fines académicos para la ejecución de prácticas de laboratorio en el área de control en la Universidad Antonio Nariño sede Tunja.

Palabras clave: (Tanques Acoplados, Control Difuso, Servoválvulas, Matlab[®]).

Abstract

The purpose of this undergraduate project is to design and build a tank plant coupled by means of diffuse control techniques, to obtain the control and monitoring of variables that appear in this process. This type of unconventional control systems is currently used in industrial processes, neural networks, genetic algorithms, among others, also being considered as control systems that can be treated by means of traditional control such as PID systems. In this work, we selected the management of diffuse control systems through the MATLAB® software tool, accessing the original license of the software provided by the university and giving good use to these tools with academic benefits that are available to students and dozen of the institution.

A communication was made between the hardware that involves sensors and servo valves with the software in order to have measurement and control results. This communication is carried out by means of an acquisition card which allows us to only make the communication between the hardware and the software.

This control plant was designed and implemented for academic purposes for the execution of laboratory practices in the control area at the Antonio Nariño University, Tunja headquarters.

Key words: (Coupled Tanks, Diffuse Control, Servo Valves, Matlab®).

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Introducción	1
1. Capítulo 1: Marco Teórico	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Teoría del control difuso	6
1.2.1 Sistemas de Control.....	7
1.2.2 Controladores Difusos o Fuzzy	7
1.2.3 Fuzzificacion	8
1.2.4 Evaluación de reglas.....	9
1.2.5 Defuzzificacion	9
1.3 Válvula.....	10
1.3.1 Definición	10
1.3.2 Tipos de válvulas	11
1.3.3 Válvulas tipo mariposa	11
1.3.4 Válvulas tipo globo	11
1.3.5 Válvula tipo diafragma.....	12
1.3.6 Válvula tipo compuerta.....	12
1.3.7 Válvula tipo bola.....	13
1.4 Bridas	13
1.4.1 Bridas con cuello para soldar (Welding Neck)	14
1.4.2 Bridas deslizantes (slip-on)	14
1.4.3 Bridas ciegas	15
1.4.4 Bridas con asiento para soldar.....	15
1.4.5 Bridas roscadas (Threaded).....	16
1.4.6 Bridas de orificio.....	17
1.5 Potenciómetro lineal	17
1.6 Servomotores 360°	18
1.6.1 Características de un servomotor.....	18
1.7 Toolbox fuzzy Matlab.....	18
1.7.1 Fuzzy Logic Designer.....	18
1.7.2 Sistemas de inferencia difusa Mamdani y Sugeno	19
2. Capítulo 2: Desarrollo Metodológico	21

2.1	Análisis y modelamiento del sistema	21
2.1.1	Bloques funcionales de la planta	22
2.1.2	Modelamiento del sistema	24
2.2	Construcción de la planta	28
2.2.1	Taques de almacenamiento	29
2.2.2	Chasis Planta	30
2.2.3	Tanque de Almacenamiento	32
2.3	Instrumentación y acondicionamiento.....	33
2.3.1	Servoválvulas	33
	Válvula. 34	
	Pistón de cierre de válvula.	35
	Servomotor.	36
	Piñones. 36	
	Potenciómetro multivuelatas precisión lineal.....	37
2.3.2	Sensor ultrasonido.....	38
2.3.3	Arduino.....	40
2.3.4	Shield de conexiones.....	42
2.4	Diseño y construcción del controlador difuso.....	44
2.4.1	Control tanque uno	44
	Entrada control tanque uno.....	44
	Salidas control tanque uno.....	45
	Reglas de control de nivel tanque uno.	46
	Diseño en Simulink.	46
2.4.2	Control tanque dos.	47
	Entrada control tanque dos.....	48
	Salidas control tanque dos.....	48
	Reglas de control de nivel tanque dos.	49
	Diseño en simulink.....	49
2.4.3	Control de los dos tanques acoplados.	50
	Entrada uno tanques acoplados.....	50
	Entrada dos tanques acoplados.....	51
	Salida bomba corriente continua tanques acoplados.	52
	Salida servoválvulas tanques acoplados.....	53
	Reglas de control de nivel tanques acoplados.	55
	Diseño en simulink.....	56
2.5	Diseño app en MATLAB.....	56
2.6	Implementación y verificación de funcionamiento.....	57
2.6.1	Planta de control de tanques acoplados	57
3.	Capítulo 3: Resultados y Análisis.....	59
3.1	Lectura Nivel Sensores De Ultrasonido	59
3.2	Servoválvula en Matlab	61
3.3	Control bomba de corriente continua.....	63
3.4	Control de la planta de nivel de líquidos en tanques acoplados.....	63
	Control tanque uno.	64
	Control tanque dos.....	66
	Control dos tanques acoplados.....	67
3.5	Manejo de app en Matlab	71
4.	Conclusiones y Recomendaciones.	73
4.1	Conclusiones.....	73

4.2	Recomendaciones	74
A.	Anexo: Manual de usuario del Diseño y construcción de una planta de tanques acoplados mediante técnicas de control difuso.	77
B.	Anexo: Manual técnico del diseño y construcción de una planta de tanques acoplados mediante técnicas de tanques de control difuso.....	83
	Bibliografía	93

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 : Función de membresía para fuzzy entrada baja.....	8
Figura 1-2: Funciones únicas.....	10
Figura 1-3: Válvula tipo mariposa.....	11
Figura 1-4: Válvula tipo globo.....	12
Figura 1-5: Válvula tipo diafragma.....	12
Figura 1-6: Válvula tipo compuerta.....	12
Figura 1-7: Válvula tipo bola.....	13
Figura 1-8: Brida con cuello para soldar.....	14
Figura 1-9: Brida tipo deslizante.....	14
Figura 1-10: Brida tipo ciegas.....	15
Figura 1-11: Brida con asiento para soldar.....	16
Figura 1-12: Brida roscada.....	16
Figura 1-13: Brida de orificio.....	17
Figura 1-14: Potenciómetro lineal.....	17
Figura 2-1: Bloques funcionales de la planta.....	22
Figura 2-2: Planta Final Instrumentada con nombres de la instrumentación.....	28
Figura 2-3: Recipiente para acondicionamiento.....	29
Figura 2-4: Tanque con llaves acondicionadas.....	30
Figura 2-5: Vista posterior del chasis.....	30
Figura 2-6: Vista frontal del chasis.....	31
Figura 2-7: Chasis cortado.....	31
Figura 2-8: Chasis con pintura electrostática.....	32
Figura 2-9: Tanque de almacenamiento.....	32
Figura 2-10: Diseño servoválvula.....	33
Figura 2-11: Instrumentación de la Servoválvula.....	34
Figura 2-12: Diseño válvula tipo globo en software Solid Edge.....	35
Figura 2-13: Válvulas impresas en PLA.....	35
Figura 2-14: Servomotor 360°.....	36
Figura 2-15: Plano acotado del piñón.....	36
Figura 2-16: Piñón acople del pistón.....	37
Figura 2-17: Potenciómetro lineal 5k.....	37
Figura 2-18: Sensor ultrasonido acoplado.....	38
Figura 2-19: Disco para medición de nivel.....	38
Figura 2-20: Arduino Due.....	41
Figura 2-21: Tarjeta Arduino DUE con pines de conexión.....	42

Figura 2-22:	Diseño Shield para Arduino en proteus.....	43
Figura 2-23:	Diseño impreso en báquela de fibra de vidrio	43
Figura 2-24:	Entradas control tanque uno o superior.	44
Figura 2-25:	Salidas control bomba de corriente continua.	45
Figura 2-26:	Salidas control servoválvula uno.....	45
Figura 2-27:	Reglas control del nivel en tanque uno.	46
Figura 2-28:	Diseño en simulink control tanque uno.	47
Figura 2-29:	Entradas control tanque dos.	48
Figura 2-30:	Salidas para servoválvulas.	48
Figura 2-31:	Reglas control tanque dos.	49
Figura 2-32:	Diseño en simulink control tanque dos.....	49
Figura 2-33:	Grafica términos lingüísticos variable ERROR1	51
Figura 2-34:	Grafica términos lingüísticos variable ERROR2.....	52
Figura 2-35:	Grafica Términos lingüísticos variable BOMBA.....	53
Figura 2-36:	Grafica términos lingüísticos SERVOVAL1.....	54
Figura 2-37:	Grafica términos lingüísticos SERVOVAL2.....	55
Figura 2-38:	Reglas implantadas para el control de tanques acoplados.	55
Figura 2-39:	Diseño Simulink control tanques acoplados.....	56
Figura 2-40:	Interfaz gráfica APP.....	57
Figura 2-41:	Planta Final Instrumentada.....	58
Figura 3-1:	Lectura sensor uno desde Simulink	59
Figura 3-2:	Lectura sensor dos desde el software.....	60
Figura 3-3:	Grafica medida sensor tanque superior	60
Figura 3-4:	Grafica medida sensor tanque inferior	60
Figura 3-5:	Configuración servoválvula tanque uno.	61
Figura 3-6:	Configuración servoválvula tanque dos	61
Figura 3-7:	Grafica estabilización servoválvula uno	62
Figura 3-8:	Grafica estabilización servoválvula dos	62
Figura 3-9:	Bloque configuración bomba DC	63
Figura 3-10:	Diagrama simulink control tanque uno	64
Figura 3-11:	Grafica de resultado control tanque uno	65
Figura 3-12:	Fotografía tanque uno estabilizado.....	65
Figura 3-13:	Diagrama en simulink control tanque dos	66
Figura 3-14:	Grafica de resultado control tanque dos	67
Figura 3-15:	Fotografía tanque dos estabilizado.....	67
Figura 3-16:	Control dos tanques simulink.....	68
Figura 3-17:	Grafica salida del control tanques acoplados.....	69
Figura 3-18:	Graficas con cambio de nivel en tanque uno y dos.	69
Figura 3-19:	Tanques estabilizados en el valor estipulado por el usuario	70
Figura 3-20:	Fotografía de tanques acoplados estabilizados.	70
Figura 3-21:	App en Matlab.	71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Sensor tanque superior.....	39
Tabla 2-2: Sensor tanque inferior.....	40
Tabla 2-3: Términos lingüísticos variable ERROR1.....	51
Tabla 2-4: Términos lingüísticos variable ERROR2.....	52
Tabla 2-5: Términos lingüísticos variable BOMBA.....	53
Tabla 2-6: Términos lingüísticos variable SERVOVAL1.....	54
Tabla 2-7: Términos lingüísticos variable SERVOVAL2.....	54

Introducción

En la actualidad, a nivel académico, el uso de tanques acoplados contribuye al estudio y desarrollo de sistemas de control lineal y no lineal, además de otorgar una manera didáctica para realizar prácticas de laboratorio que conlleven a la solución de problemáticas a menor escala, en este trabajo de grado se desarrolla una planta de tanques acoplados para el manejo de nivel de líquidos mediante técnicas de control difuso.

Con este trabajo de grado se desarrolla un sistema a baja escala de tanques acoplados para el control de nivel del agua, teniendo el sensado de variables para realizar la implementación de lazos de control de las señales obtenidas de manera sistemática, analítica y lógica para dar soluciones académicas y en la industria, en este tipo de sistemas de control es necesario tener elementos como bombas de llenado y válvulas de conexión entre tanques.

En la industria es frecuente encontrar sistemas que requieren controlar el nivel de agua o de líquidos en uno o más tanques, el presente trabajo de grado se implementa para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño de la ciudad de Tunja, aplicando los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Electrónica, el cual consiste en entregar una planta de control de un sistema de tanques acoplados mediante la medición y control de variables que se presentan en procesos didácticos, el control difuso usa oraciones, en forma de reglas, para controlar un proceso.

El controlador puede tomar muchas entradas, y la ventaja del control difuso es la capacidad de incluir conocimiento experto, la interfaz al controlador es un lenguaje más o menos natural, y eso es lo que distingue el control difuso de otros métodos de control, es generalmente un controlador no lineal.

Es muy necesario que los futuros Ingenieros Electrónicos de la Universidad Antonio Nariño se actualicen y estén a la vanguardia de las nuevas tecnologías en el mundo, consideramos como estudiantes y como personas que los estudiantes debemos indagar e investigar en el tema de control de nivel de tanques y sobre todo implementarlos en situaciones que ayuden y traten de mejorar el funcionamiento de proyectos antiguos y futuros, tradicionalmente la enseñanza de control se ha realizado mediante conceptos teóricos y de fundamentación que aunque son muy importantes en la formación teórica de control, no permite una fácil apropiación del conocimiento ni tampoco indagar acerca de nuevos campos distintos al control clásico y moderno.

Con el desarrollo de este trabajo de grado se diseña y construye una planta de tanques acoplados para controlar el nivel de agua por medio de técnicas de control difuso, con el fin de emprender el interés por el desarrollo de nuevas técnicas no convencionales, brindando además una herramienta para actividades académicas e investigativas como alternativas de conocimiento y la enseñanza en las asignaturas afines como control, automatización, instrumentación electrónica, entre otras a partir de la búsqueda de alternativas a los conocimientos adquiridos en nuestra formación académica, de esta manera damos solución a nuestro interrogante de cómo abordar nuevos métodos complementarios a nuestra formación profesional, que contribuyan a la enseñanza en los programas de Ingeniería de la Universidad Antonio Nariño en la sede de Tunja.

Actualmente en la Universidad Antonio Nariño aunque cuenta con algunos equipos para la enseñanza del control automático, no son suficientes en cuanto a la disponibilidad ni a las posibilidades de manipulación con dichas plantas, esto ocasiona dificultades a la hora de implementar las diferentes estrategias de control vistas en clase, ya que la elaboración e instrumentación de una planta de control requiere de mucho tiempo y de una considerable inversión, por tal motivo los diseños en la mayoría de los casos terminan siendo solamente simulados, por otro lado el sistema de control de nivel de tanques acoplados es una gran herramienta para comprobar visualmente los diseños de estrategias de control clásicas lineales y no lineales ofreciendo al estudiante gran interacción.

Para la enseñanza de sistemas de control se requiere disponer de plantas que posibiliten tomar mediciones en tiempo real y realizar cambios a las variables que inciden en su comportamiento, permitiendo identificar las posibles respuestas ante diferentes estímulos

y a su vez modelar correctamente un sistema de control que parametrice las variables presentes dentro del mismo, es allí donde juega un papel importante la experimentación ya que es la comparación de datos teóricos respecto a los datos prácticos, la implementación de tanques acoplados tiene una gran relevancia en el desarrollo de diferentes prácticas con el fin de acercar a los estudiantes al ámbito industrial, además de favorecer el conocimiento para las materias relacionadas con la instrumentación industrial y control automático. El desarrollo del prototipo de tanques acoplados pretende establecer la oportunidad para que la comunidad universitaria efectúe las modificaciones pertinentes en beneficio de nuevas prácticas de laboratorio, uno de nuestros objetivos es la innovación y creatividad de buscar nuevas formas de realizar una planta de tanques acoplados para la realización de prácticas de laboratorio en la Universidad.

Actualmente, la facultad FIMEB de la Universidad Antonio Nariño de la ciudad de Tunja cuenta con un espacio suficiente para prácticas de laboratorio. Sin embargo, no se cuenta con equipos para la realización de prácticas de control, por este motivo que los estudiantes no realizan prácticas físicas de las estrategias de control, la idea es dar el primer paso a la implementación de este sistema ser usado en las respectivas prácticas de laboratorio ya que debemos aprovechar que la universidad cuenta con licencia del software Matlab® el cual es de gran ayuda en la enseñanza del control automático, de esta manera estimulara el uso de este tipo de herramientas las cuales debemos aprovechar, tenemos como referencia un trabajo de grado desarrollado en el 2017, la cual se tiene en cuenta las observaciones y recomendaciones de diseño que se plantearon en el trabajo de grado antes mencionado para realizar varias mejoras, ya que este proyecto solo consta de un tanque, en este trabajo se incluyeron dos tanques y la creación de una aplicación para introducir las señales de entrada, nuestro objetivo es que se puedan realizar prácticas en materias afines a control, instrumentación y demás.

Con este trabajo de grado deseamos realizar el diseño y construcción de un sistema de control de tanques acoplados para el control, medición y monitoreo, por medio del software del Matlab® el cual otorga al usuario la posibilidad de interactuar en tiempo real con el prototipo evidenciando cambios y características presentadas en los parámetros de cada una de las variables de entrada y salida del sistema, se utilizó el software de Matlab® ya que la universidad proporciona la licencia, siendo esto también, una gran motivación

para que todos los estudiantes utilicemos las diferentes herramientas que nos ofrece la Universidad.

El objetivo general que se persigue con el desarrollo de este proyecto es el siguiente:

- Desarrollar un sistema de control de líquidos para dos tanques acoplados mediante técnicas de control difuso para la realización de prácticas académicas.

De igual manera, se pretenden lograr los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir una planta de control de un sistema didáctico de tanques acoplados.
- Instrumentar y acondicionar las señales de la planta de control para tanques acoplados.
- Diseñar e instrumentar un controlador difuso de nivel de líquidos para el sistema de tanques acoplados.
- Verificar y realizar pruebas de funcionamiento de todo el sistema de control difuso.

Como resultado esperado del proyecto se diseña un prototipo fijo y funcional capaz de medir en nivel de líquidos en dos tanques acoplados por medio de técnicas de control difuso utilizando el software MATLAB®.

1. Capítulo 1: Marco Teórico.

1.1 Antecedentes.

Cuando se investiga sobre el control de nivel de líquidos encontramos procesos industriales y académicos donde es necesario controlar el nivel de dos o más tanques, donde el comportamiento de su funcionamiento depende del caudal resultante proveniente desde otros tanques, desde este punto hay que tener en consideración los parámetros de dependencia y como resultado de esto se tienen una respuesta impredecible.[1]

Los sistemas de nivel de líquidos en la industria son utilizados cuando se necesitan el depósito de líquidos y controlar el nivel de contenido, algunas de las industrias que implementan estos sistemas son las petroquímica, productoras de papel, tratamiento de aguas, y toda tipo de industria donde el operario corre alto riesgo en el manejo de líquidos.[1]

Estos sistemas en el área académica en Colombia se encuentran diferentes modelos realizados por universidades uno de estos modelos se encuentra en la Universidad del Cauca donde implementaron el modelamiento y simulación de un proceso de control de nivel para tanques obteniendo modelos dinámicos en Matlab®, aplicando leyes de balance de masa y energía.[2]

En la Universidad Tecnológica de Pereira en el año 2010 implementaron un control de nivel utilizando sensores de presión diferencial, ejerciendo este control en un sistema hidráulico y así controlar el llenado y vacío mediante un autómata programable de Siemens.[3]

En el año 2017 en la Universidad Antonio Nariño de la ciudad de Tunja se desarrolló un trabajo de grado basado en un único tanque, el control fue desarrollado el software LabVIEW de National Instruments™.

En la Universidad Antonio Nariño sede Tunja no se han explorado métodos o estrategias de control no lineal, esta es una de las razones por la cual se desea dar punto de partida en estas alternativas al control moderno aplicando el método de control difuso, el cual se basa en la asociación de la percepción que tienen las personas con una formulación ambigua uno de los ejemplos más claros es la temperatura de una habitación y el resultado de este control depende de la definición de las persona operadora frente al fenómeno.[4]

En el control difuso contiene una variedad de términos para la ejecución de un proceso, cuando se trabaja este tipo de controladores se tiene como ventaja tener un sistema de múltiples entradas y salidas, una de las ventajas más relevantes es el que el operador puede incluir sus conocimientos de manejo de los sistemas. El lenguaje aplicado en el diseño de estos controladores es un lenguaje más libre, siendo esto lo que distingue el control difuso a otros métodos de control. Este tipo de controladores son aplicados en el control no lineal y junto a sistemas de algoritmos genéticos y redes neuronales, se forma el control no convencional.[5]

En este trabajo integral de grado se aplica varios elementos, teorías o métodos entre algunos se relaciona su parte conceptual y teórica a continuación.

1.2 Teoría del control difuso

La teoría del control difuso o también llamado control fuzzy, es un método común, el cual se base en la lógica difusa, que se trata sobre como las personas ven el medio como ejemplo tenemos con la velocidad que se mueve un objeto, un objeto puede moverse rápido o lento, la altura de una persona, la persona es alta baja medio alta, cada una de las afirmaciones cambian dependiendo del observador, dentro de un grupo de observadores del mismo fenómeno pueden encontrarse variaciones entre la perspectiva de cada uno.[6]

El profesor Lofti Asker Zadeh en 1.965, introdujo en uno de sus artículos para la Universidad de California, da un concepto de la lógica difusa como una teoría matemática de conjuntos clásicos como se puede trabajar matemáticamente con expresiones imprecisas, tal como lo hace el ser humano, la palabra difuso se puede interpretar como algo borroso o indistinto, que su pertenencia a un conjunto que tiene distintos grados de

pertenencia y distintos grados de no pertenencia, como, pertenece un poco o no pertenece mucho, por citar un ejemplo.[7]

1.2.1 Sistemas de Control

El control automático surge para liberar al hombre de tareas repetitivas, donde la complejidad del sistema a controlar es elevada o la operación es riesgosa para la vida propia, puede haber una gran cantidad de motivos por la cual se opta por el control automático, por otro lado el control manual es llevado a cabo por personas que conocen (aunque sea de manera aproximada) el proceso a controlar, tienen conocimiento de cómo se debe operar y que resultado de esta se desea tener, en la industria estas personas (operarios) cuentan con experiencia y conocimiento suficiente para cumplir con los objetivos de control, este concepto de experiencia o base de conocimiento es muy importante en sistemas de control difuso.[8]

1.2.2 Controladores Difusos o Fuzzy

Cuando se trata de controladores difusos, igual que trabajar con otros controladores, se tienen valores para las variables de entrada, se hacen el procesamiento, y finalmente actúan sobre sus salidas para ejecutar un control.

Los controladores difusos o fuzzy control, se basan en sistemas de reglas empleando la lógica difusa siendo este su elemento principal, ya que como se ha nombrado esta lógica depende de la observación de la persona que tiene manipulación sobre las plantas o elementos a controlar.

Estos sistemas dependen del estado que se encuentren las variables de entrada, evalúan lo acertado que sea cada una de las reglas, y de esta manera se tiene una decisión sobre los cambios a ejecutar en las variables de salida. Cuando se actualizan las reglas o las variables efectúan cambios sobre la planta. [8]

El uso de estos controladores difusos para la solución de problemas de control como primer paso se debe realizar una observación de que es lo que se desea procesar ya que no son ecuaciones ni números ya que se tiene el procesamiento de cosas como ejemplo se tiene:

“Si la temperatura es muy baja ENTONCES aumente la temperatura del calefactor”

Esta clase de procesos está mucho más cercano al conocimiento y razonamiento del humano experto, ya que permite tener operaciones con palabras como más bajo, subir un poco, subir mucho, entre otros términos similares. Este es un proceso cíclico el cual puede ser dividido en tres grandes partes, fuzzificación, evaluación de reglas y defuzzificación.[8]

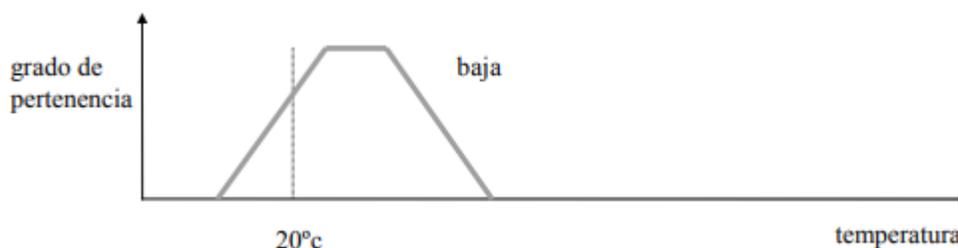
1.2.3 Fuzzificación

Cuando se tiene un control fuzzy en la primera parte de los sistemas encontramos la fuzzificación, el cual consiste en la adquisición de los valores de las variables del sistema y poder calcular otras variables, enseguida se calcula el grado de pertenencia de las variables a todos los conjuntos de entregada que se asignen.

Se continúa teniendo como referencia el ejemplo de la variable temperatura, fijando un valor de temperatura 20°C, este valor se cuantifica el grado de pertenencia a los conjuntos representados con las siguientes etiquetas lingüísticas, temperatura_muy_baja, temperatura_baja, temperaturatemplada, temperatura_alta y temperatura_muy_alta. Para esto se tiene una definición para cada una de las etiquetas, una función de membresía, la cual da definición de cuales valores de la variable para la temperatura les hace pertenencia y con qué grado.

Las funciones de membresía son las que permiten cuantificar los conceptos que representan las etiquetas. En la figura 1-1 se puede observar las funciones de membresía para el fuzzy entrada baja, y el valor de pertenencia para 20°C.[8]

Figura 1-1 : Función de membresía para fuzzy entrada baja.



Fuente: fuzzy control theory, Zhu Yuanguo.

1.2.4 Evaluación de reglas

Como segundo paso para un control fuzzy, luego de la fuzzificación se aplica la condición de evaluar los antecedentes de las reglas, obteniendo el grado de verdad, un ejemplo de regla es:

“Si la temperatura es baja ENTONCES aumente la temperatura del calefactor.”

El grado de verdad de la regla estará dado por la veracidad que tienen sus antecedentes. Se asigna como peso, el valor leído de temperatura a la etiqueta lingüística baja. En el caso de antecedentes de reglas con conectores lógicos (Y), como, por ejemplo:

Si la temperatura es baja Y el cambio de temperatura es ligeramente creciente ENTONCES aumente la temperatura del calefactor.

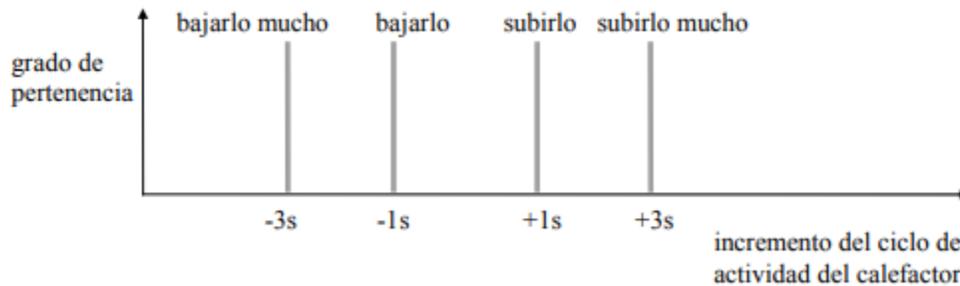
La regla en este caso será tan verdadera como lo sea el menos acertado de sus antecedentes. Es así como peso se le asigna, el menor de los grados de pertenencia de las variables de los antecedentes a las respectivas etiquetas lingüísticas, estos pasos se realizan para cada una de las reglas del sistema.

Para las variables de salida también se les asigna un grupo de las funciones de membresía, representadas con etiquetas lingüísticas. Se le llama a cada una fuzzy output como ejemplo se tiene subir_mucho, subir, bajar, bajar_mucho).

A cada salida de fuzzy se le da una asignación como valor, o grado de aplicabilidad, el máximo valor entre todas las reglas que la mencionan, de tal manera que, al finalizar toda la evaluación, queda cada fuzzy de salida con su valor respectivo.[8]

1.2.5 Defuzzificación

Para el ejemplo se tomará la forma más simple de funciones de membresía, esta es considerada a un solo elemento del universo de discurso perteneciente totalmente al conjunto. Este tipo de funciones se denominan funciones únicas.[8] en la figura 1-2 se muestra el ejemplo de funciones únicas.

Figura 1-2: Funciones únicas.

Fuente: fuzzy control theory.

A cada fuzzy de salida, se le asignó el máximo valor de verdad o peso de las reglas que la mencionan como consecuente.

Ahora se tienen diferentes fuzzy de salida para cada una de las variables, cada una de estas con su respectivo valor de verdad, o grado de aplicabilidad, pero surge ahora una nueva pregunta ¿cuál es el valor nuevo de cada una de las variables de salida? Una de las formas más simples y efectivas para determinarlo es realizando un promedio ponderado entre todas las fuzzy de salida que le corresponden a una variable de salida.

Para el caso en que las funciones de membresía no sean funciones simples, se procede en forma similar, pero considerando las superficies de las fuzzy de salida, afectadas por su valor de aplicabilidad, y tomando el centro de gravedad de las mismas como el nuevo valor de la variable de salida en consideración. Una vez actualizada la variable de salida, se está en condiciones de comenzar un nuevo ciclo.[8]

1.3 Válvula

1.3.1 Definición

Las válvulas son dispositivos mecánicos los cuales cumplen las funciones de controlar, regular, retener, o permitir el paso a un fluido principalmente, las válvulas son un ensamblaje compuesto de un cuerpo con conexión a una tubería, y del obturador en operación debido a una acción, el cual no permite el paso del fluido cuando se encuentra cerrado el contacto con los sellos.

Además de los elementos y sistemas de estanqueidad intrínsecos para cada clase de válvula, éstas pueden tener incorporado una serie de accesorios como posicionados, transductores, reguladores de presión, entre otros. Los cuales proporcionan información y facilitan también la automatización de la válvula.[9] [10]

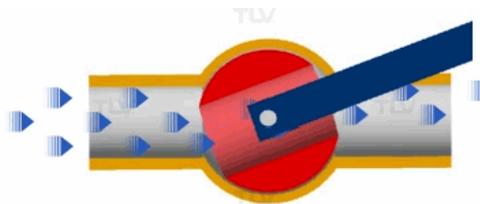
1.3.2 Tipos de válvulas

En el mercado podemos encontrar varios tipos de válvulas, pero las más comúnmente utilizadas manualmente son el tipo globo, bola, compuerta y mariposa a continuación se encuentra una breve definición de los cada uno de estos tipos de válvula.

1.3.3 Válvulas tipo mariposa

Este tipo de válvulas cuentan con un tipo de cierre que hace rotación en la vía de circulación para que el flujo sea detenido en la figura 1-3 se muestra un ejemplo de este tipo de válvula.[9]

Figura 1-3: Válvula tipo mariposa.

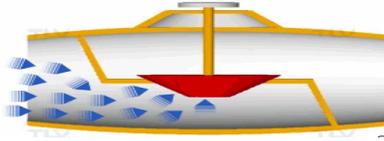


Fuente: Catalogo Osman Industries.

1.3.4 Válvulas tipo globo

Este tipo de válvulas cuentan con un cierre que actúa como un sello o tapón en la vía de circulación para poder detener el flujo del líquido en la siguiente Figura 1-4 podemos observar un ejemplo de este tipo; este tipo de válvula fue el elegido para el desarrollo de este proyecto para el control de caudal.[9]

Figura 1-4: Válvula tipo globo.

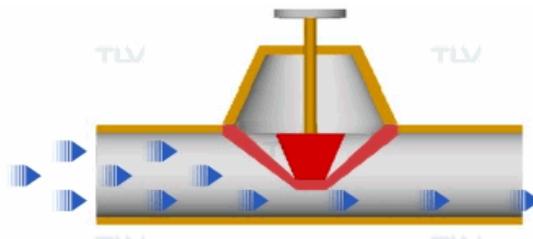


Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.3.5 Válvula tipo diafragma

Este tipo de válvulas la vía de circulación es presionada desde el exterior para poder detener el flujo que pasa por ella un modelo de estas válvulas lo podemos observar a continuación en la Figura 1-5.[9]

Figura 1-5: Válvula tipo diafragma.

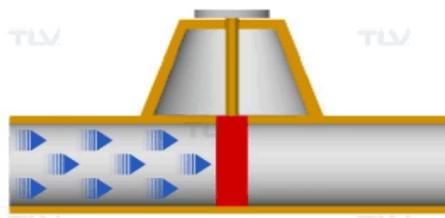


Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.3.6 Válvula tipo compuerta

Este tipo de válvula posee un elemento de cierre el cual es insertado en la vía de circulación del flujo para detener al mismo, a continuación, en la Figure 1-6 se muestra aun ejemplo de este tipo de válvula. [9]

Figura 1-6: Válvula tipo compuerta.

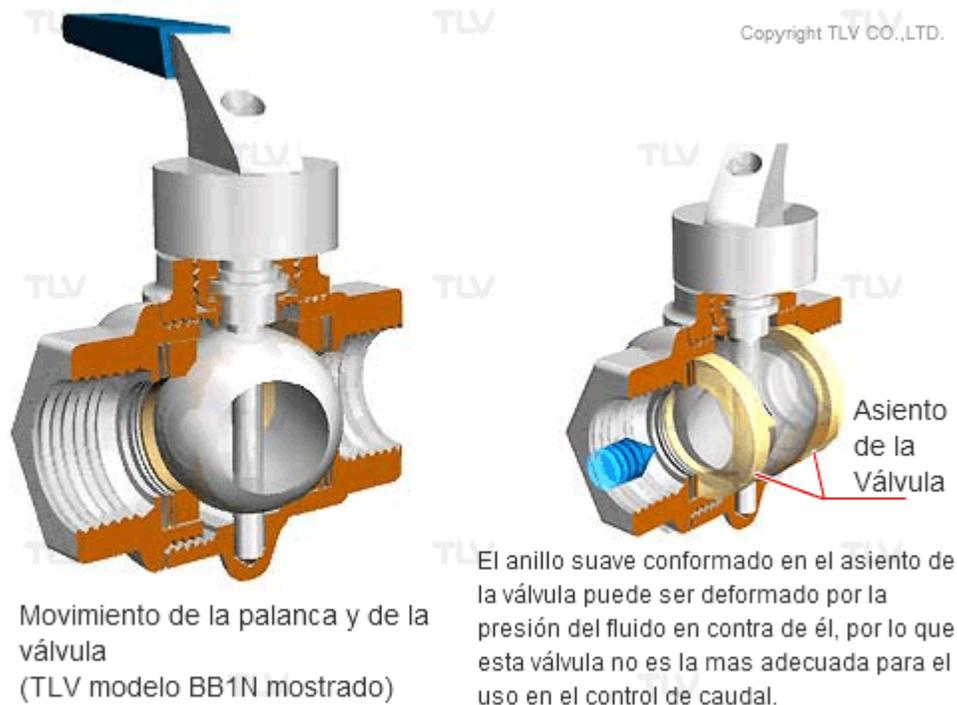


Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.3.7 Válvula tipo bola

Este tipo de válvulas tienen una alta capacidad de cierre y practicidad para el cierre y apertura ya que se realiza esta actividad con tan solo hacerle un giro de 90°; estas pueden ser de paso completo lo que genera una caída de presión en la Figura 1-7 se muestra este tipo de válvula.[9]

Figura 1-7: Válvula tipo bola.



Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

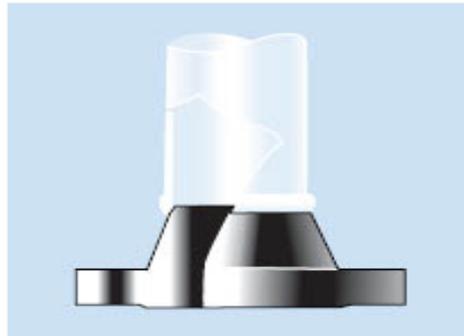
1.4 Bridas

Las bridas tienen como función principal unir dos elementos de diferentes sistemas como lo son sistemas de tuberías facilitando de la misma manera la desunión sin dificultades en el momento deseado; estos elementos son utilizados en multitud de sectores entre ellos el ámbito de la construcción e industria en general.

1.4.1 Bridas con cuello para soldar (Welding Neck)

Este tipo de bridas se diferencian por el largo del cuello de forma cónica, uno de sus extremos se suelda al borde del tubo que se utilice, el diámetro interior del tubo es del mismo que el diámetro de la de la brida en la Figura 1-98 se muestra un modelo de este tipo de bridas.[12]

Figura 1-8: Brida con cuello para soldar.

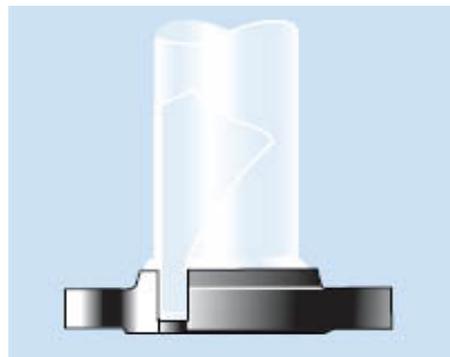


Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.4.2 Bridas deslizantes (slip-on)

En este tipo de bridas, se tiene un tubo que se introduce en el cubo de la misma sin llegar al plano de la cara de contacto, el cual tiene una unión por medio de soldadura interna y externa.[12], en la siguiente figura 1-9 se muestra un ejemplo del diseño de bridas tipo deslizantes.

Figura 1-9: Brida tipo deslizante.

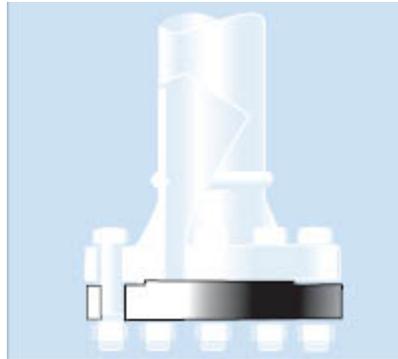


Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.4.3 Bridas ciegas

Este tipo de bridas están diseñadas para cerrar extremos de tubería, válvulas, entre otras uniones, soportando diferentes presiones de trabajo. Desde lo técnico, este tipo de bridas, es el que soporta condiciones de trabajo resistentes, ya que al esfuerzo que están sometidas por la tracción de los bulones, se la agrega la presión existente en la tubería. Donde la temperatura sea un factor de trabajo o actúen esfuerzos variantes o cíclicos, se recomienda realizar cierres mediante el acople de bridas con cuello y ciegas.[12], en la siguiente figura 1-10 se muestra un ejemplo del diseño de bridas tipo ciegas.

Figura 1-10: Brida tipo ciegas

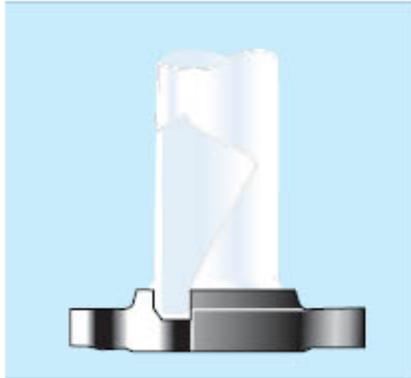


Fuente: catalogo Osman Industries.[11]

1.4.4 Bridas con asiento para soldar

Este tipo de bridas principalmente son usadas en tuberías de dimensiones pequeñas que conduzcan fluidos a altas presiones. En bridas el tubo penetra dentro del cubo hasta tener contacto con el asiento el cual es del mismo diámetro interior que el tubo quedando así un conducto suave y sin cavidades. Es frecuente el uso de estas bridas en tuberías destinadas a procesos químicos, por su particular característica de conceder al conducto una sección constante.[12], en la siguiente figura 1-11 se muestra un ejemplo del diseño de bridas tipo con asiento para soldar.

Figura 1-11: Brida con asiento para soldar



Fuente: Catalogo Bripetrol[12]

1.4.5 Bidas roscadas (Threaded).

Este tipo de bridas tienen la característica de no tener soldadura lo cual permite un fácil y rápido ensamblaje. No es conveniente utilizarlas en conductos donde se produzcan cambios de temperatura, ya que por efectos de la dilatación de la tubería, pueden tenerse pérdidas por medio del roscado al cabo de un corto período de trabajo.[12], en la siguiente figura 1-12 se muestra un ejemplo del diseño de bridas tipo roscadas.

Figura 1-12: Brida roscada

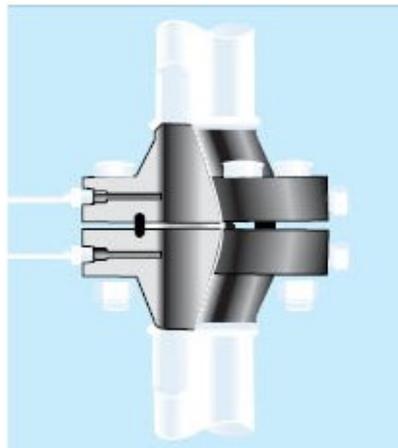


Fuente: Catalogo Bripetrol [12]

1.4.6 Bridas de orificio

Las bridas de orificio son bridas las cuales están destinadas a ser colocadas en puntos de la línea donde existen instrumentos de medición. Son similares a los otros tipos de bridas; la selección del tipo brida se debe a la función de trabajo de la tubería. Tienen dos agujeros roscados para conectar los medidores. Este sistema tiene una desventaja con respecto al anterior, ya que cuando se deteriora la rosca, se inutiliza la brida para tal función.[12], en la siguiente figura 1-13 se muestra un ejemplo del diseño de bridas tipo orificio.

Figura 1-13: Brida de orificio



Fuente: Catalogo Osman Industries.[11]

1.5 Potenciómetro lineal

Los potenciómetros son sensores de posición los cuales son utilizados como sensores de posición que tienen como principio el divisor de voltaje en una resistencia. Estos elementos electrónicos tienen una barra fija al objeto en movimiento y esto hace cambiar el valor de la resistencia; en la figura 1-14 se ilustra el potenciómetro que se adecuo para el prototipo.

Figura 1-14: Potenciómetro lineal.



Fuente: Autores

1.6 Servomotores 360°

Los servomotores son dispositivos similares a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en esa posición. Un servomotor es un motor eléctrico que puede ser controlado tanto en velocidad como en posición. Estos dispositivos tienen como característica una fuerza superior, mayor velocidad y baja inercia.[13]

1.6.1 Características de un servomotor

Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. También potencia proporcional para cargas mecánicas. Los servomotores tienen un consumo de energía reducido.

La corriente que requiere depende del tamaño del servomotor. Normalmente el fabricante indica cuál es la corriente que consume. La corriente depende principalmente del par, y puede exceder un amperio si el servo está enclavado.[13]

1.7 Toolbox fuzzy Matlab.

El software de Matlab cuenta con toolbox exclusivo para la lógica difusa llamado Fuzzy Logic Toolbox™ el cual proporciona funciones de MATLAB®, apps y un bloque de Simulink® para el análisis, simulación y diseño de sistemas para la lógica difusa.

Este toolbox permite el modelamiento de sistemas complejos por medio de reglas lógicas simples y así poder realizar la implementación en una inferencia difusa. Puede ser utilizada como motor de inferencia difusa independiente. También puede utilizar bloques de inferencia difusa en Simulink y simular los sistemas difusos dentro de un modelo completo de todo el sistema dinámico.[14]

1.7.1 Fuzzy Logic Designer

La app Fuzzy Logic Designer se utiliza desde la línea de comandos para el diseño interactivo de sistemas difusos. Se permite agregar o eliminar variables de entrada y salida, se pueden especificar funciones de pertenencia de entrada y salida, así como reglas if-then difusas. Después de crear el sistema difuso, se puede evaluar y visualizar.[14]

1.7.2 Sistemas de inferencia difusa Mamdani y Sugeno

Implemente sistemas de inferencia difusa Mamdani y Sugeno. Es posible convertir un sistema Mamdani en un sistema Sugeno. También se pueden implementar sistemas de inferencia difusa complejos como una colección de sistemas difusos interconectados más pequeños mediante árboles difusos.[14]

2. Capítulo 2: Desarrollo Metodológico.

Hoy en día, en la industria y en el ámbito académico se habla y se manejan los temas de control basados en el uso de controladores P, PI y PID, pero poco se habla de sistemas de control difuso para el manejo de algunos equipos y plantas en los cuales no se ha podido obtener un modelo matemático exacto pero su funcionamiento manual de usuario es el correcto, así es como un modelo de controladores difusos permiten generar un ámbito más amplio de cómo efectuar un control sobre una planta partiendo del conocimiento de un operario, quien realmente conoce términos como: un poco, alto, muy alto, entre otros, variables lingüísticas manejadas desde la experiencia humana.

Este proyecto tiene como finalidad dar a conocer el manejo de un sistema de control difuso aplicado en una planta de nivel de líquidos de dos tanques acoplados usando herramientas de software como Matlab[®], así mismo se presenta como mejora el desarrollo de actividades académicas prácticas dentro de la universidad Antonio Nariño con los estudiantes de la facultad FIMEB de la sede Tunja.

2.1 Análisis y modelamiento del sistema

De acuerdo con el funcionamiento previsto, se procede a analizar la manera en que se va a diseñar y construir la planta. La planta como tal requiere de una serie de elementos interconectados que permitan cumplir con su función principal y que brinden los atributos deseados.

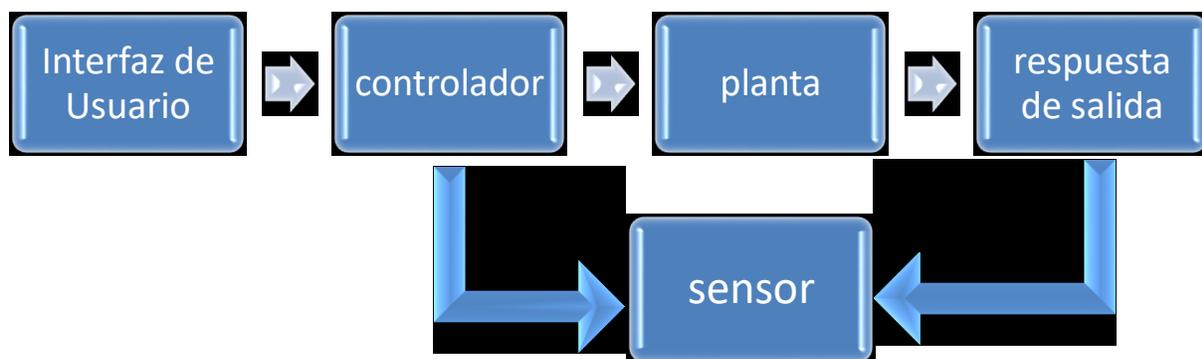
La manera más práctica de analizar la planta es considerarlo como un sistema en general, ya que requiere elementos de captación, transmisión, procesamiento y salida:

- El elemento de captación es el que permite de manera eficiente determinar la cantidad de líquido para obtener el nivel que se encuentra cada uno de los tanques.
- Los elementos de transmisión reciben y transfieren los datos entre sí, están conectados a los elementos de procesamiento.
- Los elementos de procesamiento están encargados de realizar el control y conversión de datos necesarias para que las señales obtenidas del sistema tengan un sentido de graficas de control difuso y no se tengan solo señales de control on/off.
- Los elementos finales permiten la visualización de los valores ya procesados como resultados del control.

2.1.1 Bloques funcionales de la planta

Visto como un sistema y establecidos los elementos que los componen se pueden considerar los bloques de la planta a nivel de ingeniería como un conjunto de bloques funcionales teniendo en cuenta que cada uno de ellos está compuesto por distintos dispositivos electrónicos y mecánicos que interactúan entre sí. El sistema está compuesto por cinco bloques básicos los cuales se visualizan en la figura 2-1.

Figura 2-1: Bloques funcionales de la planta.



Fuente: El autor.

Luego de conocer el diagrama de bloques que se planteó para el diseño del sistema a continuación se encuentra una breve descripción de cada uno de ellos:

- El bloque de interfaz de usuario se diseñó en el software de Matlab de tal manera que ejecutara de manera práctica la utilización por parte del usuario de la planta, en esta aplicación ejecutable permite dar inicio al sistema, y de la misma forma finalizar el proceso, se encuentran dos editores para poder ingresar el nivel que desea tener en cada uno de los tanques el usuario.
- El bloque de planta hace referencia al sistema de hardware que se diseñó instrumentado de dos tanques acoplados interconectados por medio de las servoválvulas.
- El bloque llamado respuesta de salida hacemos referencia a la respuesta que tiene cada tanque cada vez que se le asigna un nivel esta acción la ejecuta las servoválvulas la bomba de corriente continua, ya que son los elementos que podemos controlar desde nuestro sistema.
- El bloque sensor es el que nos permite adquirir el dato del nivel de cada tanque y eso nos permite realimentar nuestro sistema de control, y así realizar nuestro lazo cerrado en el sistema.
- El bloque del controlador es el bloque más decisivo de la planta de nivel, ya que es el que da el control difuso del sistema y ejecuta las ordenes a donde se debe estabilizar cada nivel de líquido en los tanques, en este bloque se va a encontrar el diseño del controlador difuso, con todas sus secciones y parámetros de reglas aplicadas desde la experiencia del operario de una forma manual.

En óptimas condiciones el funcionamiento de la planta permite el control de nivel de líquidos en dos tanques acoplados accionando servoválvulas, adicionalmente este control se realiza desde una aplicación ejecutada y programada desde Simulink[®], software de Matlab[®] teniendo una adquisición de datos en una variable sobre tiempo real.

Se requiere que la medición de nivel este lo más cercana al dato real en cm lineales para ello se usan unos sensores de ultrasonido que permite obtener el nivel de agua en cada tanque medido en cm con una medida máxima de 18 cm de profundidad. También se cuenta con unas servoválvulas las cuales se diseñaron y construyeron paso a paso, para

tener una apertura y cerrado proporcional a la diferencia de nivel que se encuentra en el recipiente visible y el nivel que el operario desea tener.

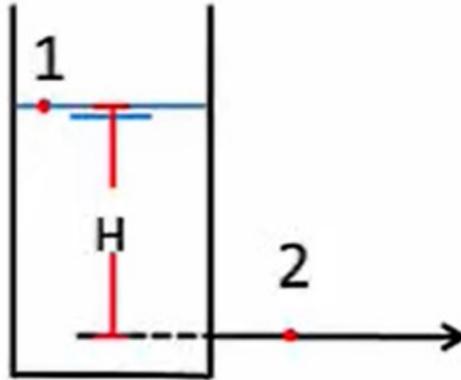
Para poder realizar la transmisión y recepción de datos se ejecuta desde una placa de adquisición de datos Arduino DUE, la cual cumple la tarea únicamente de transmisión y recepción de los datos para funcionamiento de la planta, se pide que el usuario cuente con el software de Matlab® versiones superiores a 2018b para poder realizar la ejecución del diseño de este proyecto para poder ejecutar el control del nivel en cada uno de los tanques de la planta. Se obtuvo un diseño y construcción de un modelo de tanques acoplados lo necesariamente fuerte para la realización de prácticas académicas, para su cuidado y mantenimiento se debe realizar cada vez que se le va a dar uso, de la misma manera se debe tener un cuidado y buen manejo en el momento de ejecución de prácticas, la estructura cuenta con piezas adicionales como repuestos que puedan ser las más factibles a daños por trabajo cotidiano, igualmente los planos de cada uno de los componentes se encuentran anexados en los manuales para cambios en materiales o en estructura que se requieran en un futuro.

2.1.2 Modelamiento del sistema

Una de las características del sistema de control difuso, es que no requiere de modelo matemático, sino de reglas de expertos en este caso de quien diseña el controlador, sin embargo, otra característica es también que este tipo de controladores son muy útiles en sistemas de Múltiple entrada Múltiple Salida (MIMO) y los sistemas no lineales.

Por lo tanto, el modelamiento matemático al que se refiere esta sección se realiza con el fin de demostrar la no linealidad del sistema, y no el de realizar algún tipo de linealización mediante algún método, ya que como acabamos de mencionar no se utilizará,

Para el modelamiento debemos analizar tanto su modelo estático como su modelo dinámico, para el modelo estático del sistema partimos del principio de Bernoulli el cual se va a conocer y entender en este apartado:



Partiendo del principio de Bernoulli (ver Ecuación 2-1).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2-1)$$

El sistema de tanques acoplados está hecho a partir de recipientes sin tapa, por lo tanto, la presión en el punto 1 es igual a la presión en el punto 2, que corresponde a la presión atmosférica.

Como dicha presión se encuentra a ambos lados de la ecuación, se elimina y se reescribe la ecuación de la siguiente manera (ver Ecuación 2-2):

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2-2)$$

Ahora si se considera la altura 2 (h_2) en la ecuación, como altura de referencia es decir cero metros (0m), para considerar la altura en el punto 1 (h_1) como simplemente H, quedaría ahora escrita la ecuación de la siguiente forma(ver Ecuación 2-3).

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g H = \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (2-3)$$

Por último y para simplificar el análisis se debe considerar que, como el área del tanque, comparado con el área del orificio de salida, es muy grande, la velocidad de salida será también muy grande con respecto a la velocidad en la altura del tanque, tanto que podemos considerar a v_1 como cero (0), por lo tanto la ecuación quedaría escrita de la siguiente forma(ver Ecuación 2-4)

$$\rho g H = \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (2-4)$$

Cancelando a ambos lados el término de la densidad (ρ) y despejando la velocidad al cuadrado se tendría (ver Ecuación 2-5):

$$v_2^2 = 2gH \quad \text{ó} \quad v_2 = \sqrt{2gH} \quad (2-5)$$

En ambas ecuaciones conocidas como el principio de Torricelli, se observa la relación no lineal de la velocidad de salida del fluido con respecto al nivel del tanque, donde la velocidad de salida es la raíz de dos veces la gravedad por la altura.

Y finalmente para el caudal que es la velocidad del flujo por unidad de área se tiene (ver Ecuación 2-6):

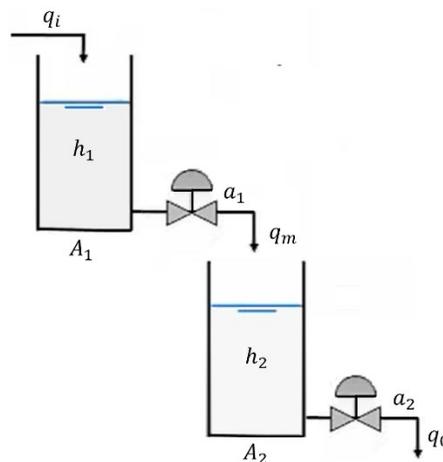
$$Q = a\sqrt{2gH} \quad (2-6)$$

Donde a es el área de la sección transversal del orificio de salida.

Debido a esto es necesario, realizar el control en una zona donde el comportamiento sea más o menos lineal mediante un proceso llamado linealización, en caso de querer controlar el nivel del tanque usando control clásico o moderno y manipular el caudal de salida o, de entrada, ya que el control moderno se basa en sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI).

Por otro lado, también se utilizan métodos de control no convencionales, que es uno de los objetivos del presente proyecto y por tanto utilizar el control difuso.

para el modelamiento dinámico de un sistema se debe tener en cuenta otros parámetros de modelamiento para tanques acoplados:



Para el sistema de tanques acoplados se puede analizar su comportamiento dinámico así:

La variación en el nivel del primer tanque, o dicho de otra forma la variación en el volumen de agua que contiene el tanque será igual al caudal de entrada q_i menos el caudal de salida q_m (ver Ecuación 2-7):

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - q_m \quad (2-7)$$

Aunque el flujo de entrada de nuestra planta cuenta con un control de flujo de entrada, para el control de los tanques se considerara constante y el flujo de salida q_m será entonces el área de la sección transversal de la salida multiplicada por la velocidad de salida, tendremos entonces (ver Ecuación 2-8):

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = Q_i - a_1 \sqrt{2gh_1} \quad (2-8)$$

Podemos observar claramente que no se trata de una ecuación diferencial lineal debido a la raíz cuadrada que aparece en el segundo término de la derecha de la ecuación, y la segunda ecuación dinámica del segundo tanque será (ver Ecuación 2-9):

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_m - q_o \quad (2-9)$$

Y realizando el mismo análisis que para el primer tanque, tenemos (ver Ecuación 2-10):

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = a_1 \sqrt{2gh_1} - a_2 \sqrt{2gh_2} \quad (2-10)$$

En esta ecuación también se ve el comportamiento no lineal de la dinámica del segundo tanque.

Para continuar con un análisis tradicional o mediante técnicas de control moderno deberíamos linealizar el sistema, convertir nuestras ecuaciones diferenciales al dominio de la frecuencia mediante transformada de Laplace, sin embargo lo que queremos evidenciar aquí es simplemente el comportamiento no lineal del sistema y justificar el uso de una estrategia de control no lineal o no convencional, como lo es el control difuso, que como ya se dijo anteriormente no requiere este tipo de análisis matemático.

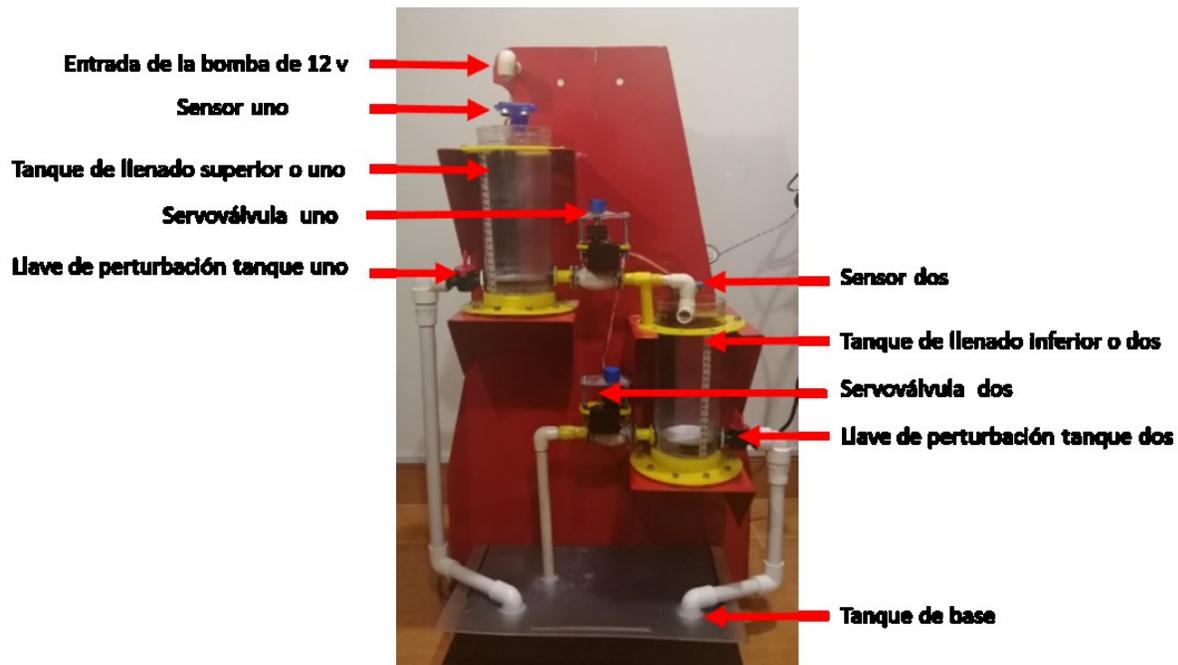
2.2 Construcción de la planta

Para la construcción del prototipo se inició teniendo en base los tanques acoplados de Quanser, basándonos en estos modelos ya que son una empresa desarrolladores de diseños de módulos para laboratorios en áreas específicas de la ingeniería en las áreas principalmente de control; dándonos confiabilidad en el desarrollo de modelos que son efectivos para su desarrollo, así teniendo como base un modelo físico para el diseño ya que se deseaba de un módulo de tanques acoplados didácticos y robustos para prácticas de laboratorio, de la Universidad Antonio Nariño.

Este prototipo consta de dos tanques acoplados, los cuales cada uno cuenta con un sensor ultrasónico servoválvulas las cuales interconectan los dos tanques y al tanque base donde se encuentra una bomba de corriente directa de llenado.

Todos los elementos antes nombrados se encuentran acoplados en una estructura diseñada en Solid Edge, software donde se diseñó todo el prototipo, en este se realizó el diseño propio de las servoválvulas y estructura, en la figura 2-2 se muestra el diseño final de la planta instrumentada con todos sus elementos y nombres.

Figura 2-2: Planta Final Instrumentada con nombres de la instrumentación.



Fuente: Autores.

2.2.1 Taques de almacenamiento

Para la instrumentación de nuestra planta se hicieron varias pruebas para realizar los acoples de los tanques que se deseaban utilizar, en un comienzo se diseñó un tanque para realizar impresión en 3D cuando se fue a realizar la impresión se desistió de esta idea ya que el costo de impresión es alto y el mantener un tanque de agua en este material es complicado debido a que se pueden presentar fugas cuando la presión de agua este presente, así que se pensó en otro material más accesible y práctico para la construcción se pensó en un diseño más firme como sería en acrílico pero esta opción tampoco fue viable debido a los costos, así que se hizo una búsqueda en el mercado de recipientes de almacenamiento que se encontraran con facilidad se ensayó con recipientes en vidrio pero este materiales muy frágil para nuestro objetivo, así que finalmente se encontró un recipiente plástico con las dimensiones aproximadas deseadas siendo este material mucho más fácil para adecuar las servo válvulas, las válvulas de perturbación y los sensores a usar.

A continuación, se presenta el recipiente que finalmente se usó en la instrumentación de la planta en la Figura 2-3 se muestra este recipiente que fue encontrado en el mercado el cual cuenta con una tapa hermética la cual fue extraída debido a que no es necesario uso en nuestra implementación las dimensiones de este recipiente son 10cm de diámetro y 25cm de altura.

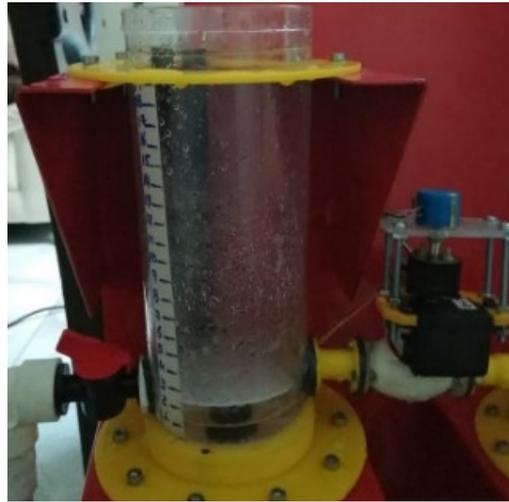
Figura 2-3: Recipiente para acondicionamiento.



Fuente: <https://www.exito.com/frasco-hermetico-acrilico-pequeno-253831/p?idsku=907676>

A cada uno de los recipientes se les realizo una adaptación de dos acoples uno para la válvula de perturbación y otro para la adición del servo válvula en la Figura 2-4 se muestra los recipientes con los acoples.

Figura 2-4: Tanque con llaves acondicionadas.

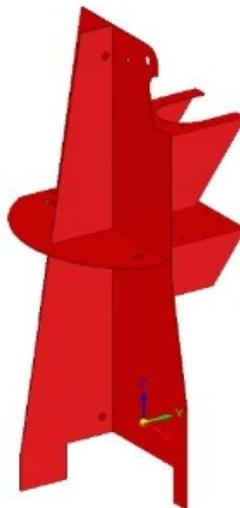


Fuente: Autores.

2.2.2 Chasis Planta

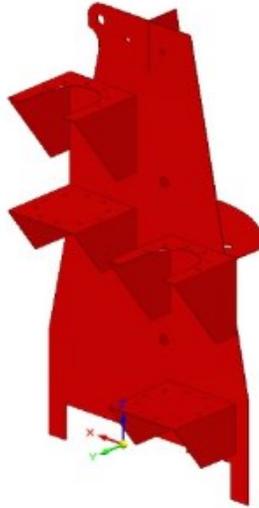
El diseño del chasis de la planta se realizó en el software Solid Edge, este diseño se realizó deseando tener como resultado una estructura robusta y con un tamaño considerable para poder acondicionar los elementos que conforman la planta tanto de los dos tanques como de los acoples para las servoválvulas y llaves de perturbación; en la Figura 2-5 se muestra el diseño en el software de la estructura en su parte posterior, continuamente en la figura 2-6 se puede observar el diseño del chasis en su cara frontal.

Figura 2-5: Vista posterior del chasis.



Fuente: Autores.

Figura 2-6: Vista frontal del chasis.



Fuente: autores.

Para la fabricación del chasis de la planta se realizó el corte en aluminio con corte plasma en la Figura 2-7 se encuentra en chasis cortado listo para enviar a pintura, de la misma manera se encuentran los tanques puestos para poder observar la proporcionalidad que se le dan con respecto al chasis; de manera continua en la figura 2-8 se muestra el chasis pintado, esta pintura se realizó con pintura electrostática roja.

Figura 2-7: Chasis cortado.



Fuente: Autores.

Figura 2-8: Chasis con pintura electrostática.



Fuente: Autores.

2.2.3 Tanque de Almacenamiento

En el software de Solid Edge se diseñó un tanque base, el cual está ubicado en la parte inferior de la planta y el cual cumple con varias funciones por su proporcionalidad permite darle estabilidad a la estructura, así mismo permite tener el líquido almacenado para suministrar a los tanques superiores tiene una salida la cual va por medio de una bomba dc que permite el bombeo al tanque superior uno, posee dos entradas las cuales son provenientes de las perturbaciones de los otros tanques y una entrada que proviene de la servo válvula inferior del tanque dos. Este tanque fue cortado en acrílico color negro su tapa traslúcida. En la figura 2-9 se muestra el tanque de almacenamiento ya acoplado a la estructura de la planta.

Figura 2-9: Tanque de almacenamiento.



Fuente: Autores

2.3 Instrumentación y acondicionamiento

Se cuenta con la instrumentación de las servoválvulas, de la bomba de corriente continua para suministro de líquido a los tanques superiores y de los sensores ultrasonido para medición del nivel de cada uno de los tanques.

2.3.1 Servoválvulas

Se realizó el diseño de servoválvulas realizando su construcción con diferentes etapas y piezas para llegar al objetivo final de este instrumento que es controlar el caudal de entrada y salida de líquido de los tanques para poder realizar el control de los mismos.

En la siguiente Figura 2-10 se muestra el prototipo diseñado en el software Solid Edge de la servoválvula, realizando la adecuación de un servomotor de 360° para poder realizar un control completo de cierre y apertura de la misma.

Figura 2-10: Diseño servoválvula



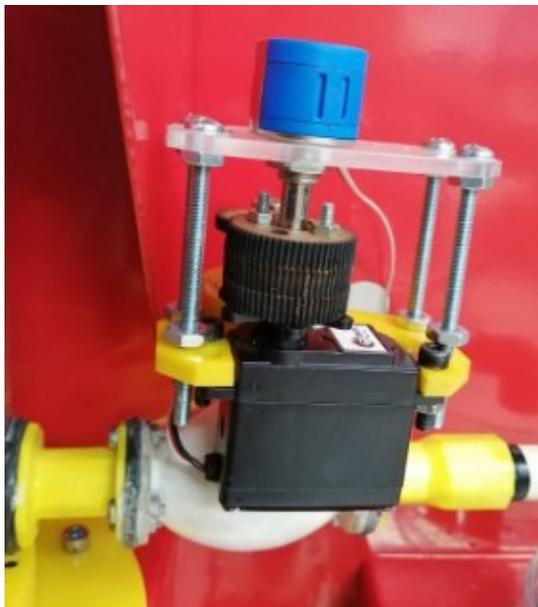
Fuente: autores

En la Figura 2-11 se hace la muestra de la instrumentación final del modelo diseñado de servoválvula, este diseño lleva un acople adicional el cual es un potenciómetro lineal en la parte superior del piñón del servomotor el cual permite conocer y controlar la posición de apertura o cierre en la que se encuentra la servoválvula.

Para la impresión de la servoválvula se realizó en material PLA en impresora 3D, a inicio se realizó una impresión de prueba de resistencia del material con respecto al agua para

observar que no sufra ninguna fuga, las válvulas se les realizó un sellado con cloruro de metileno de esta manera el material no permite filtrado de agua y así se evitan fugas de la misma, en este mismo material se acoplaron dos bridas a cada lado para realizar conexión a los tanques.

Figura 2-11: Instrumentación de la Servoválvula



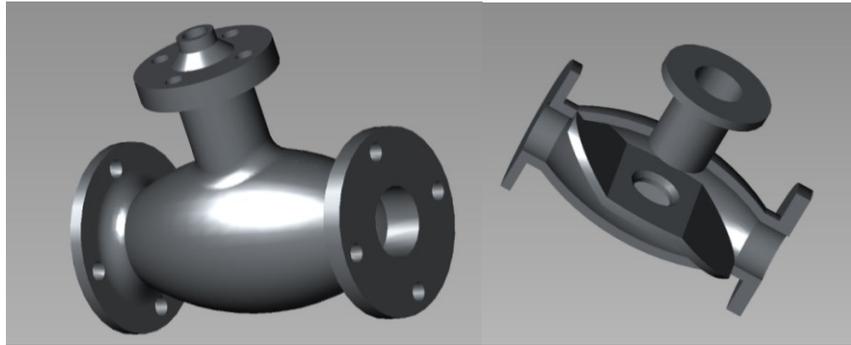
Fuente: Autor

A continuación, se encuentra la descripción de cada una de las partes que conforman la servoválvula las cuales fueron diseñadas y adaptadas para lograr obtener el prototipo anterior mostrado.

Válvula.

Tomando como base el modelo de una válvula tipo globo se diseña la válvula para lograr el cierre y apertura completa con un pistón adecuado con un tornillo el cual se dará una explicación en el ítem siguiente, en la figura 2-12 se muestra el diseño interno y externo diseñados en el software Solid Edge.

Figura 2-12: Diseño válvula tipo globo en software Solid Edge.



Fuente: Autores.

En la siguiente Figura 2-13 se muestra las válvulas impresas en 3D con material de PLA las cuales fueron instrumentadas en nuestra planta.

Figura 2-13: Válvulas impresas en PLA



Fuente: Autores.

Pistón de cierre de válvula.

se tiene la adecuación de un tornillo tipo Phillips para realizar el pistón de cierre y en la punta que queda en la parte interna de la válvula se adecuó un tapón de la misma manera impreso en 3D con el fin de que se pueda realizar un buen cierre y no se generen fugas de líquido cuando se desee tener un cierre total de la válvula.

Servomotor.

Para el cierre y apertura de la válvula de manera automática y controlada se adecuó un servomotor de 360° de giro continuo de lado derecho y lado izquierdo, en la figura 2-14 se muestra el servo motor que se implementó para el diseño de esta servoválvula.

Figura 2-14: Servomotor 360°



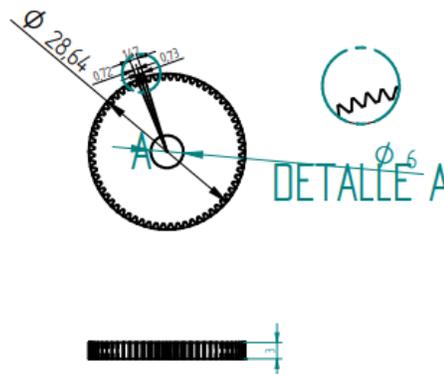
Fuente: www.ferretronica.com.

Piñones.

Para la parte de acople se diseñaron dos tipos de piñones para poder enlazar el pistón de la válvula y el aspa del servomotor con el fin que el pistón suba y baje de manera correcta y alineada para la apertura y cierre de la válvula.

En la Figura 2-15 se presenta el plano acotado del piñón que se acoplo al servomotor este piñón fue cortado en MDF de alta resistencia su diseño fue realizado en el software Solid Edge, este piñón tiene unas dimensiones de 2.5 cm de diámetro y 5 mm de grosor.

Figura 2-15: Plano acotado del piñón



Fuente: Autores

En la Figura 2-16 se muestra el piñón que va acoplado al pistón de cierre y apertura de la válvula este piñón tiene como dimensiones un diámetro de 3.7 cm y 3 mm de grosor.

Figura 2-16: Piñón acople del pistón



Fuente: Autores

Potenciómetro multivoltas precisión lineal

Para poder medir la posición en la que se encuentra el cierre y la apertura de la válvula se le implemento un potenciómetro lineal multivoltas de precisión para que el dato fuera exacto de esta manera nosotros tenemos conocimiento que la válvula cuando se encuentre en su cierre máximo el potenciómetro tiene un diferencial de voltaje de 2.73 V y cuando esté completamente abierta tiene un diferencial de 0,12v.

En la siguiente figura 2-17 se muestra un potenciómetro lineal multivoltas de precisión de 5k Ω que fue implementado en el servo válvula.

Figura 2-17: Potenciómetro lineal 5k



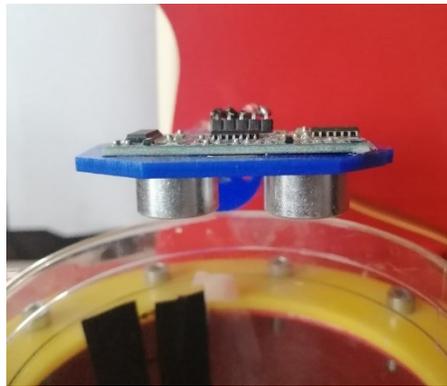
Fuente: <https://www.dieltron.com/pot2218m2-5k-oem-potenciometro-multivoltas-precision-5k-2w-lineal-47579.html>

2.3.2 Sensor ultrasonido

Para conocer el nivel del líquido en cada uno de los tanques se implementó el uso de sensores ultrasonido por su eficiencia en la lectura e implementación, que facilita tener su lectura en cualquier tipo de comunicación de datos, otra razón por la cual se seleccionó este es que podemos encontrar su librería en un bloque de Simulink del Software de MATLAB®.

para cada uno de los tanques los sensores correspondientes se ubicaron en la parte superior de cada tanque en la Figura 2-18 se observa la adaptación del sensor en uno de los tanques para que el sensor tuviera una estabilidad se le acoplaron unas bases, y dentro del agua se realizaron unos discos en materia de icopor delgado, de tal manera que suba y baje con el agua, este disco se muestra en la figura 2-19 se muestra este disco.

Figura 2-18: Sensor ultrasonido acoplado.



Fuente: Autores

Figura 2-19: Disco para medición de nivel



Fuente: Autores

luego de acondicionar el sensor e implementar el bloque en el software se realiza la linealización de estos datos para poder manejarlo en cm ya que a la visualización es más comprensible para su lectura final, para la linealización se tomaron los datos de muestra en nivel de los en 3 cm, 16 cm, y 13 cm en los dos tanques.

En la tabla 2-1 se encuentran los datos tomados por el sensor del tanque superior o tanque número uno desde el software, luego se realizan los cálculos matemáticos para la linealización del mismo de la misma manera en la tabla 3-2 los datos de del sensor del tanque inferior o tanque dos y su continuidad sus respectivos cálculos matemáticos correspondientes para su linealización (ver Ecuación 2-11, Ecuación 2-12, Ecuación 2-13, Ecuación 2-14, Ecuación 2-15, Ecuación 2-16).

Tabla 2-1: Sensor tanque superior

Dato cm	Dato emitido por sensor
3 cm	26.55
16 cm	13

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{13 - 26.55}{16 - 3} = \frac{-13.55}{13} \quad (2-11)$$

$$m = -1.04231 \quad (2-12)$$

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

$$y - 3 = -1.04231(x - 26.55)$$

$$y - 26.55 = -1.04231 * x + 3.12692$$

$$y = \frac{-x + 29.6769}{1.0423}$$

$$y = 28.47 - 0.9541 * x \quad (2-13)$$

Tabla 2-2: Sensor tanque inferior

Dato cm	Dato emitido por sensor
3 cm	23.05
13 cm	13,63

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{13.63 - 23.05}{13 - 3} = \frac{-9.42}{10} \quad (2-14)$$

$$m = -0.942$$

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (2-15)$$

$$y - 23.05 = -0.942(x - 3)$$

$$y - 26.55 = -0.942 * x + 2.826$$

$$x = \frac{-y + 29.376}{0.942}$$

$$x = 31.1847 - 1.06157 * y \quad (2-16)$$

Teniendo las ecuaciones de la recta de cada uno de los sensores se pueden implementar para hacer la lectura de nivel de cada uno de los tanques por medio de los sensores de ultrasonido, están listas para implementar en los bloques de simulink y poder tener el resultado de lectura del sistema.

2.3.3 Arduino.

Para la recepción y transmisión de datos se decide trabajar con la tarjeta de Arduino Due, por la facilidad en su captación de datos, por medio del software Matlab®, ya que es una tarjeta compatible con todas las versiones del software seleccionado para el desarrollo del

control, otra de las razones para su selección fue por el procesador de alta capacidad. Para el desarrollo del sistema se hicieron pruebas con varias tarjetas de adquisición como lo fueron, Raspberry pi3 B+ pero los resultados no fueron los más óptimos en el proceso; Arduino Mega, pero por capacidad de procesamiento no era posible ejecutar los programas.

la función de la tarjeta de adquisición en este caso como lo es el Arduino DUE es realizar únicamente el proceso de comunicación entre el software y la planta se configura como esclavo para que podamos realizar la lectura y escritura de los datos en el software en tiempo real.

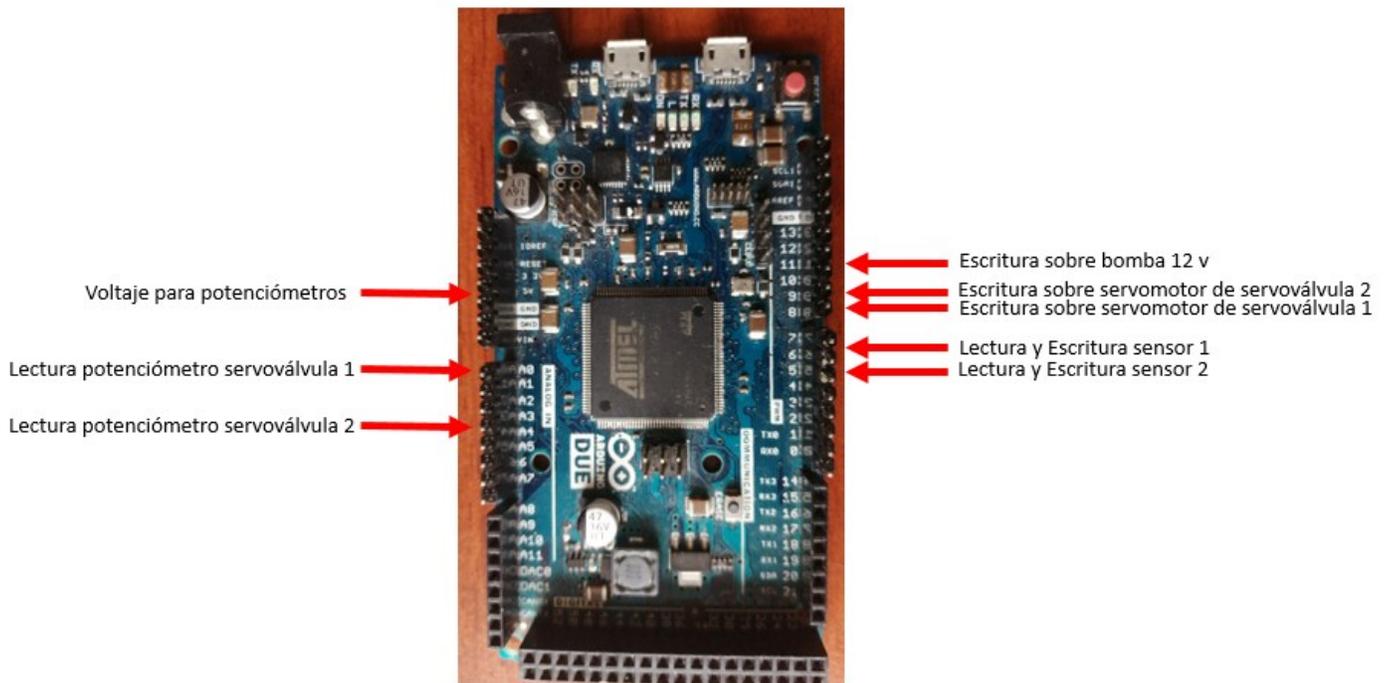
A continuación, en la Figura 2-20 se puede observar el modelo utilizado ya que este brinda el manejo de varios puertos análogos y digitales para realizar lectura y escritura sobre el mismo.

Figura 2-20: Arduino Due



Fuente: <https://store.arduino.cc/usa/duel>

Teniendo la tarjeta de Arduino DUE se conecta por su capacidad de procesamiento ya que esta planta para hacer la comunicación con el equipo necesitamos que trabaje con buen procesamiento para la lectura y escritura de los datos en tiempo real, esta tarjeta su función en nuestra planta es la de realizar comunicación entre planta y software, en la figura 2-21 se observa la tarjeta que se utilizó en el proyecto con los puertos que se utilizaron para cada actuador.

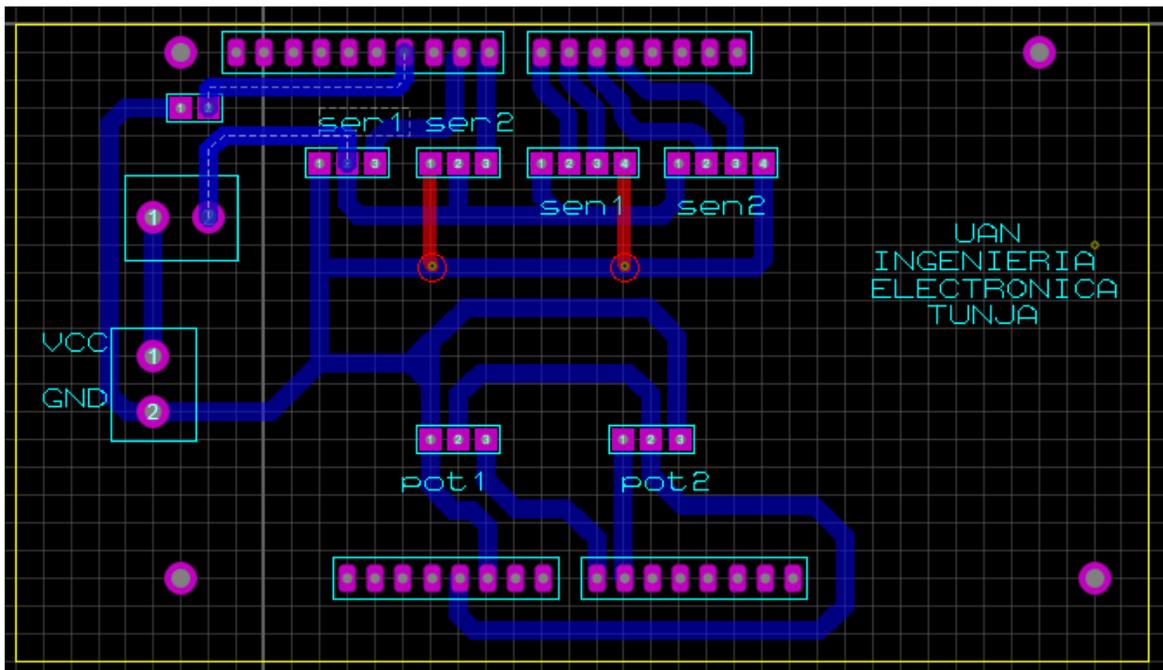
Figura 2-21: Tarjeta Arduino DUE con pines de conexión

Fuente: Autores

2.3.4 Shield de conexiones

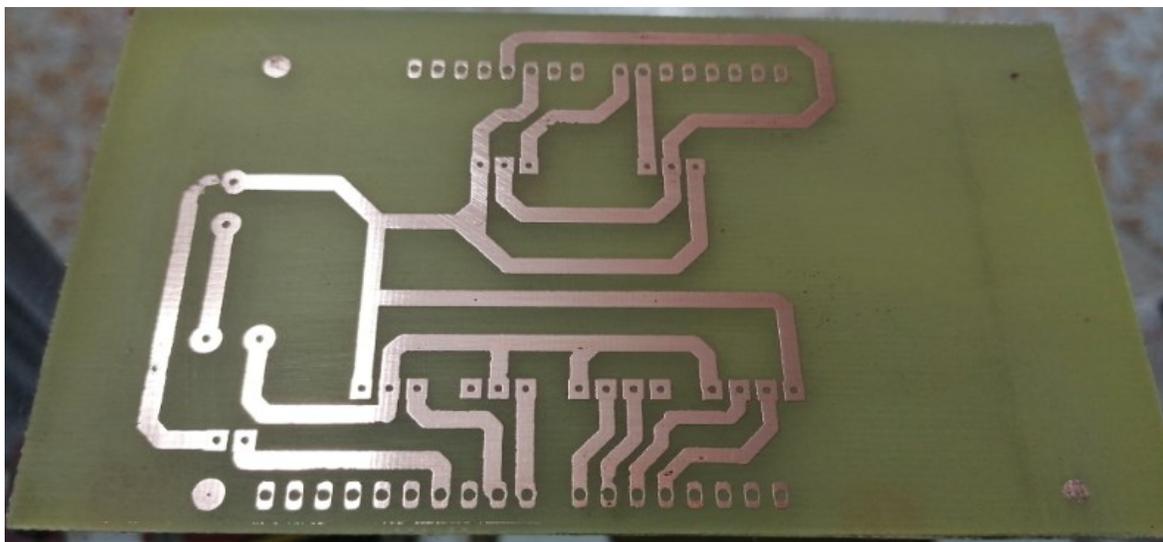
Ya que se está trabajando con una tarjeta de adquisición de datos Arduino Como ya se ha evidenciado en el párrafo anterior para poder conectar los elementos de la planta a la tarjeta se diseñó un Shield adaptado al Arduino Due, este Shield fue diseñado en el software de PROTEUS en la figura 2-22 se encuentra el diseño en el software, la PCB fue impresa en báquela de fibra de vidrio, se realizó proceso manual en su elaboración ya que es un diseño muy básico y sencillo de impresión. En la figura 2-23 se muestra la báquela con el diseño impreso, luego de tener el diseño impreso se realizó la colocación de los elementos, y se instaló para su funcionamiento.

Figura 2-22: Diseño Shield para Arduino en proteus



Fuente: Autores

Figura 2-23: Diseño impreso en báquela de fibra de vidrio



Fuente: Autores.

2.4 Diseño y construcción del controlador difuso

Para el funcionamiento del control se aplicaron un modelo de control mamdani por bloques funcionales de simulink en el software Matlab®, está diseñado por varias etapas, primero se realizó un control independiente de cada uno de los tanques y luego de tener el control de cada uno de manera independiente se procedió a realizar el control conjunto de los dos tanques, este proceso se realizó con el fin de poder aplicar el control sobre cada uno de ellos de manera independiente si en una práctica el usuario desea trabajar solo un tanque, las etapas de construcción del controlador se encuentran descritas a continuación:

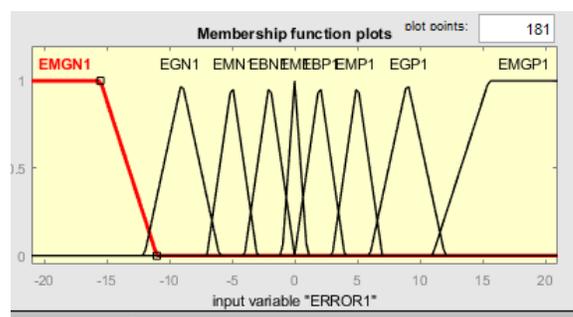
2.4.1 Control tanque uno

Inicialmente se controla el tanque superior o tanque uno, teniendo una entrada y dos salidas, la entrada hacer referencia al dato diferencial entre la lectura del sensor y el valor del nivel deseado por el usuario, y como salidas la bomba de corriente continua y la servoválvula uno, para cada una de ellas se diseñaron unas variables lingüísticas para lograr estructurar unas reglas para el funcionamiento del controlador, y de manera seguida el diseño de implementación en Simulink

Entrada control tanque uno.

para las entradas del control para el tanque uno se toma la diferencia entre el nivel que lee el sensor y el valor que desea el usuario tener en el tanque, para esto se tienen nueve variables lingüísticas se encuentran en la figura 2-24, los rangos de estas variables están entre el valor máximo medido de nivel y el valor máximo de diferencia de nivel siendo estos valores entre -20cm y 20cm.

Figura 2-24: Entradas control tanque uno o superior.



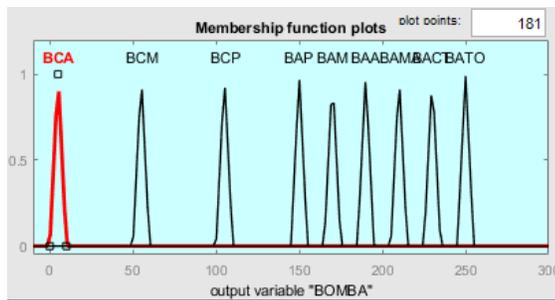
Fuente: Autores

Salidas control tanque uno.

la primera salida es el valor para la bomba de corriente continua el cual se realiza un control entre 0 y 255 que son sus máximos valores de PWM para el cerrado y apertura del mismo motor de esta bomba, las variables lingüísticas de para el control de esta bomba se encuentran en la figura 2-25, dependiendo el nivel en que se encuentre el tanque uno, se controla su caudal sea máximo si es muy inferior a la diferencia de la entrada, o mínimo si es mínima la diferencia de entrada.

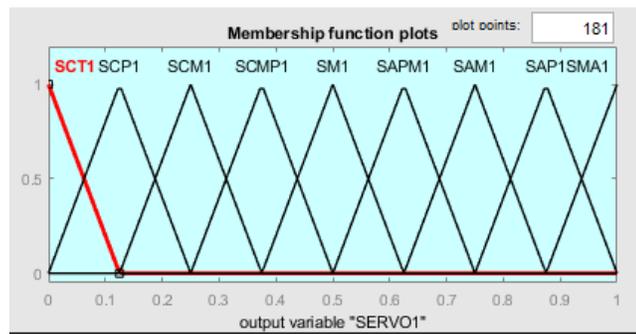
La segunda salida se tiene el control para la servoválvula uno con el análisis de cuánto debe abrir o cerrar la servoválvula dependiendo el nivel de líquido que se encuentre en tanque uno y que le permita el llenado y mantener el líquido en tanque uno y tanque dos, la servoválvula maneja un rango de apertura y cierre entre 100Ω y 800Ω este dato es tomado desde el potenciómetro que es el que nos da la posición de apertura y cierre de la servoválvula, para esto se realizan el manejo de 7 variables lingüísticas, las cuales se pueden ver en las figura 2-26.

Figura 2-25: Salidas control bomba de corriente continua.



Fuente: Autores.

Figura 2-26: Salidas control servoválvula uno.

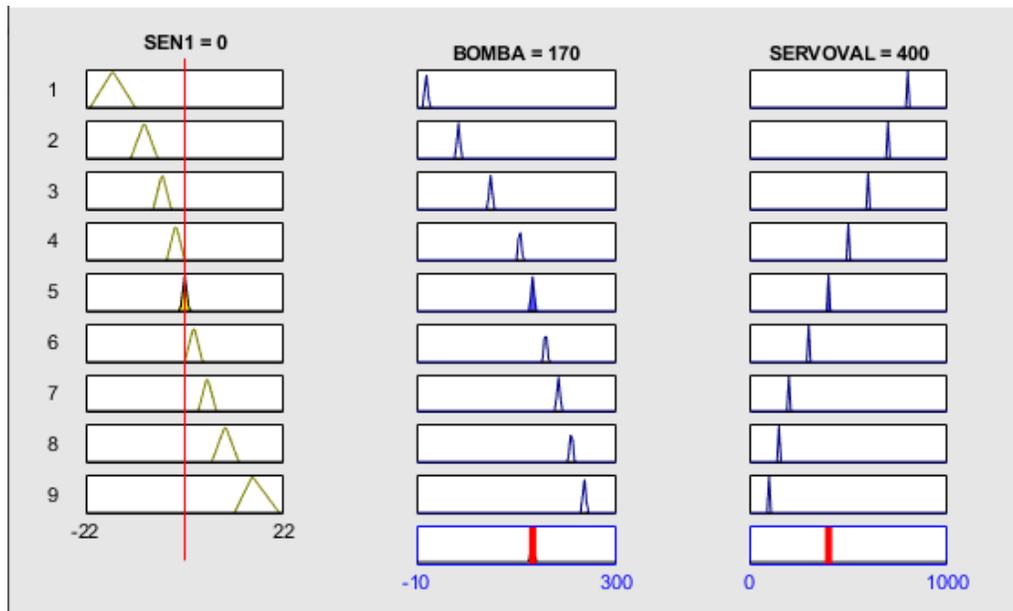


Fuente: Autores.

Reglas de control de nivel tanque uno.

Para el control del tanque uno se diseñaron nueve reglas las cuales se encuentran en la figura 2-27, las cuales dependen de las variables lingüísticas de la entrada y las salidas del controlador.

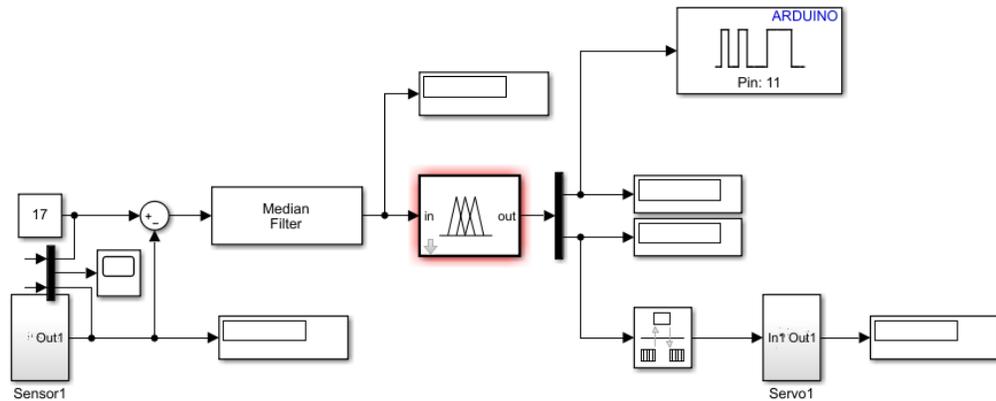
Figura 2-27: Reglas control del nivel en tanque uno.



Fuente: Autores.

Diseño en Simulink.

Luego de que se tiene el diseño del control para el tanque se procede a aplicarlo sobre el conjunto de elementos en bloques de Simulink en la figura 2-28 se puede observar la unión de bloques que se tienen para la ejecución del control, realizando lectura del nivel por medio del sensor y escribiendo la apertura o cierre a la servoválvula e igualmente a la bomba de corriente continua.

Figura 2-28: Diseño en simulink control tanque uno.

Fuente: Autores.

En el conjunto de bloques configurados anteriormente en la figura 2-28 encontramos el bloque nombrado Sensor1 como entrada, en este bloque hacemos la lectura y configuración del sensor del tanque aplicando la diferencia con respecto a la entrada que digita el usuario, como salidas encontramos dos una de ellas es un bloque configurable de la librería de Arduino que el un PWM directo de Arduino la función de este bloque es programar la señal PWM desde Matlab sin necesidad de programar el Arduino, la segunda salida corresponde al bloque denominado Servo1 que es el encargado de enviar las señales y aplicarlos sobre la servoválvula; el bloque principal usado en el control del nivel para el tanque uno es el bloque del toolbox de fuzzy de Simulink en este bloque se implementaron todas las reglas configuradas es aquí donde ya se puede interconectar con las salidas y entradas físicas para el sistema.

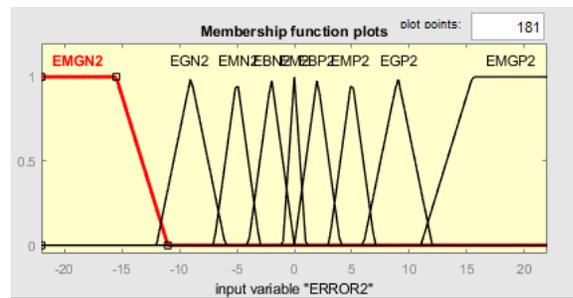
2.4.2 Control tanque dos.

Para el control de nivel en el tanque dos se tiene en cuenta como entrada la diferencia entre el nivel leído por el sensor y el nivel que usuario desea tener, y como salidas la servoválvula uno y dos, para cada una de ellas se diseñaron unas variables lingüísticas para lograr estructurar unas reglas para el funcionamiento del controlador, y de manera seguida el diseño de implementación en Simulink.

Entrada control tanque dos.

Para la entrada de este controlador se utilizó el valor diferencial entre el nivel leído por el sensor y el nivel que el usuario desea tener en este tanque. Las variables lingüísticas que describen esta tarea se encuentran en la figura 2-29, estas variables son iguales a las variables que se utilizaron en el tanque uno ya que el tamaño de los tanques es igual; los rangos de estas variables están entre el valor máximo medido de nivel y el valor máximo de diferencia de nivel siendo estos valores entre -20cm y 20cm.

Figura 2-29: Entradas control tanque dos.

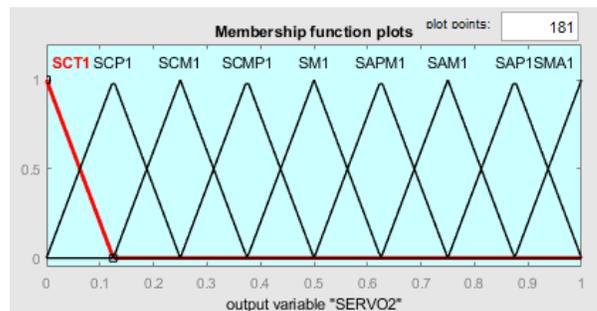


Fuente: Autores.

Salidas control tanque dos.

Como variables de salida del controlador para el tanque dos se utilizaron las mismas variables lingüísticas con los mismos rangos para las dos servoválvulas, ya que ellas cuentan con valores de apertura y cierre iguales así que se podía utilizar así, ya la diferencia es que cada salida de cada servoválvula va a cumplir unas reglas diferentes en el controlador, estas variables se observan en la figura 2-30.

Figura 2-30: Salidas para servoválvulas.

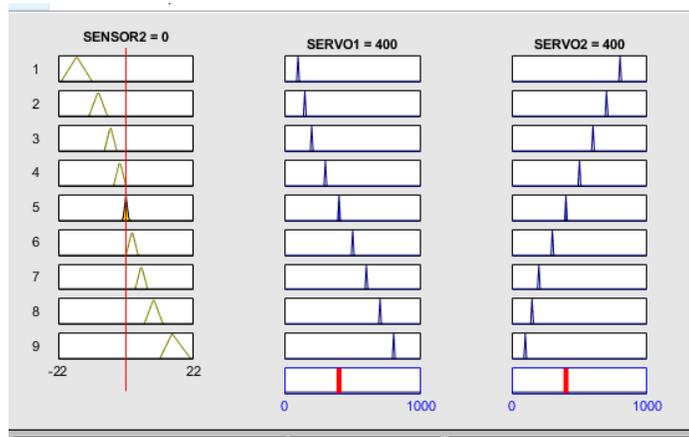


Fuente: Autores.

Reglas de control de nivel tanque dos.

Para las reglas de control se realizaron observando el comportamiento que se tiene operando el tanque de una forma manual en la figura 2-31 se observan las reglas que se tienen planteadas para el control de nivel de este tanque.

Figura 2-31: Reglas control tanque dos.

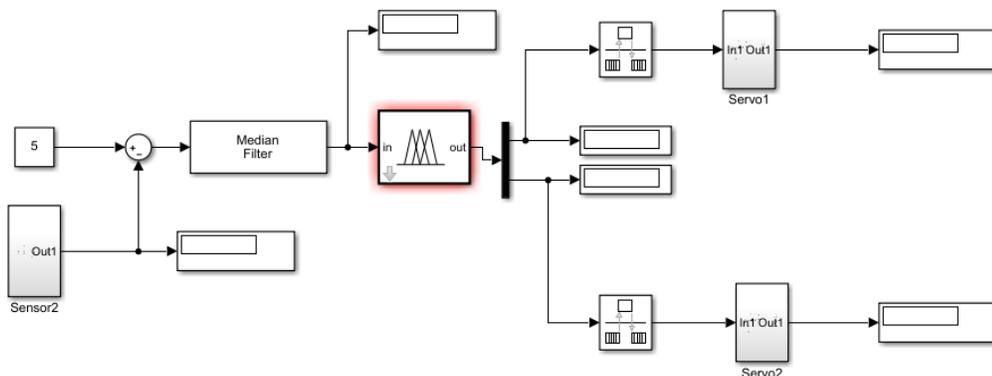


Fuente: Autores.

Diseño en simulink.

Luego de que se tiene el diseño del control para el tanque se procede a aplicarlo sobre el conjunto de elementos en bloques de Simulink en la figura 2-32 se puede observar la unión de bloques que se tienen para la ejecución del control, realizando lectura del nivel por medio del sensor y escribiendo la apertura o cierre a las servoválvulas.

Figura 2-32: Diseño en simulink control tanque dos.



Fuente: Autores.

En el conjunto de bloques configurados anteriormente en la figura 2-32 encontramos el bloque nombrado Sensor2 como entrada, en este bloque hacemos la lectura y configuración del sensor del tanque aplicando un diferencial con respecto a la entrada que digita el usuario, como salidas encontramos dos servoválvulas denominadas Servo1 y Servo2 los cuales son encargados de enviar las señales y aplicarlos sobre las servoválvulas; el bloque principal usado en el control del nivel para el tanque uno es el bloque del toolbox de fuzzy de Simulink en este bloque se implementaron todas las reglas configuradas es aquí donde ya se puede interconectar con las salidas y entradas físicas para el sistema.

2.4.3 Control de los dos tanques acoplados.

La tercera etapa a desarrollar se aplicó ya de tener el control aplicada independientemente a cada uno de los tanques, se dio proceso a unir las configuraciones de tal manera que todo el sistema quedase acoplado para el funcionamiento completo de la planta para el desarrollo de este control se determinaron dos entradas y tres salidas las cuales fueron los resultados del nivel en cada uno de los tanques, y como salidas se tiene la bomba de corriente continua y las dos servoválvulas, luego de generar las variables lingüísticas para las entradas y salidas se dispuso a diseñar las reglas de control para ser aplicadas al diseño y ejecutas desde simulink.

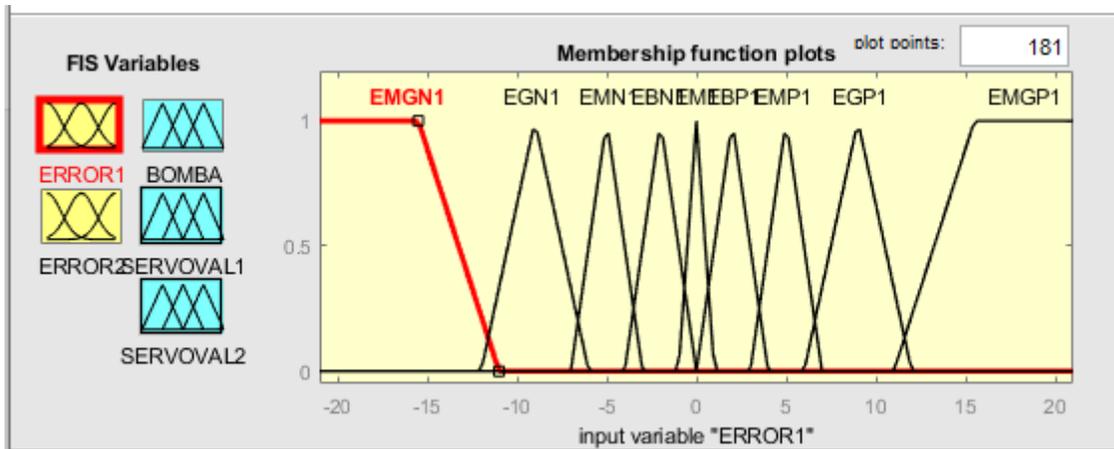
Entrada uno tanques acoplados.

la primera entrada que tenemos para este controlador es el diferencial para el sensor uno del tanque uno para este sensor se aplicaron nueve variables lingüísticas las cuales nos dan un rango si hay demasiada agua, poca agua o está cerca el nivel al nivel que está deseando, estas variables fueron nombradas como se encuentran en la tabla 2-3, se encuentran entre un rango de -21 hasta 21, este rango viene dependiendo del máximo y mínimo valor de diferencia entre el valor leído por el sensor y el valor deseado por el usuario. En la figura 2-33 se observan estas variables.

Tabla 2-3: Términos lingüísticos variable ERROR1.

TERMINOS LINGUISTICOS VARIABLE ERROR1	
ABREVIATURA	NOMBRE
EMGN1	Error muy grande negativo 1
EGN1	Error grande negativo 1
EMN1	Error medio negativo 1
EBN1	Error bajo negativo 1
EM1	Error bajo positivo 1
EBP1	Error medio positivo 1
EMP1	Error medio positivo 1
EGP1	Error grande positivo 1
EMGP1	Error muy grande positivo 1

Figura 2-33: Grafica términos lingüísticos variable ERROR1



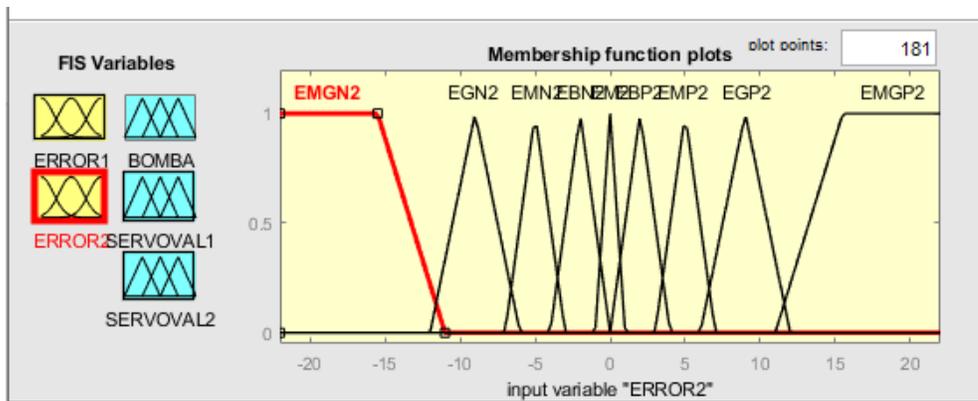
Fuente: Autores

Entrada dos tanques acoplados.

La segunda entrada del controlador es el sensor dos del tanque dos para este sensor se aplicaron nueve variables lingüísticas las cuales nos dan un rango si hay demasiada agua, poca agua o está cerca el nivel al nivel que está deseando de la misma manera como se seleccionaron los rangos en la entrada uno, estas variables fueron nombradas como se muestra en la tabla 2-4, se encuentran entre un rango de -22 hasta 22, este rango viene dependiendo del máximo y mínimo valor de diferencia entre el valor leído por el sensor y el valor deseado por el usuario. En la figura 2-34 se observan estas variables.

Tabla 2-4: Términos lingüísticos variable ERROR2.

TERMINOS LINGUISTICOS VARIABLE ERROR2	
ABREVIATURA	NOMBRE
EMGN2	Error muy grande negativo 2
EGN2	Error grande negativo 2
EMN2	Error medio negativo 2
EBN2	Error bajo negativo 2
EM2	Error bajo positivo 2
EBP2	Error medio positivo 2
EMP2	Error medio positivo 2
EGP2	Error grande positivo 2
EMGP2	Error muy grande positivo 2

Figura 2-34: Grafica términos lingüísticos variable ERROR2.

Fuente: Autores.

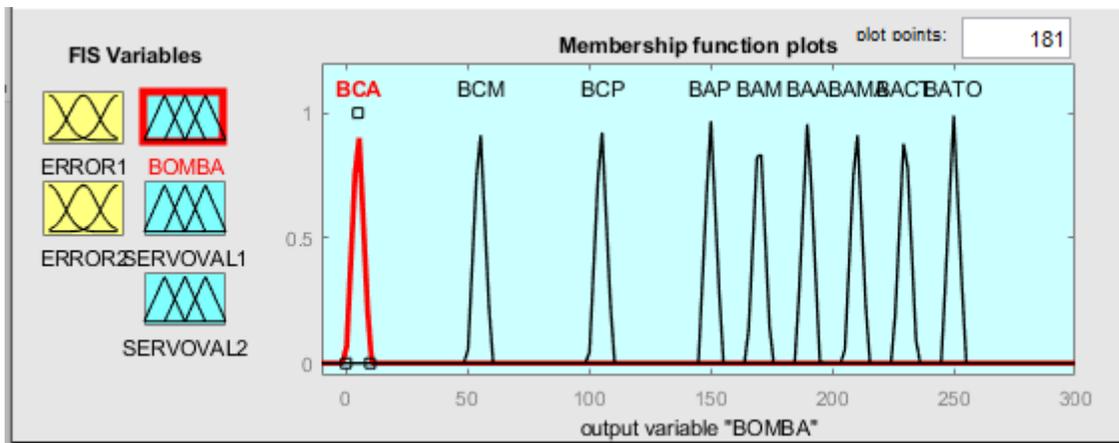
Salida bomba corriente continua tanques acoplados.

esta salida va conectada al bloque de comunicación para la bomba de corriente continua que está acoplada como entrada del líquido al tanque superior o tanque uno, para el control del PWM de esta bomba desde el controlador fuzzy se realizan un conjunto de variables lingüísticas denominadas en la tabla 2-5, las cuales fueron medidas partiendo del principio básico en electrónica que al aplicar PWM a un motor de corriente continua es proporcional al valor del PWM que se le aplique, este PWM se maneja en un rango de 0 a 255 en su ciclo de trabajo, en la figura 2-35 se muestra la distribución que se le asigna las variables lingüísticas para el control de la bomba de corriente continua.

Tabla 2-5: Términos lingüísticos variable BOMBA

TERMINOS LINGUISTICOS VARIABLE BOMBA	
ABREVIATURA	NOMBRE
BCT	Bomba cerrada total
BCM	Bomba cerrada medio
BCP	Bomba cerrada poco
BAP	Bomba abierta poco
BAM	Bomba abierta medio
BAA	Bomba abierta alto
BAMA	Bomba abierta muy alto
BACT	Bomba abierta casi todo
BATO	Bomba abierta total

Figura 2-35: Grafica Términos lingüísticos variable BOMBA.



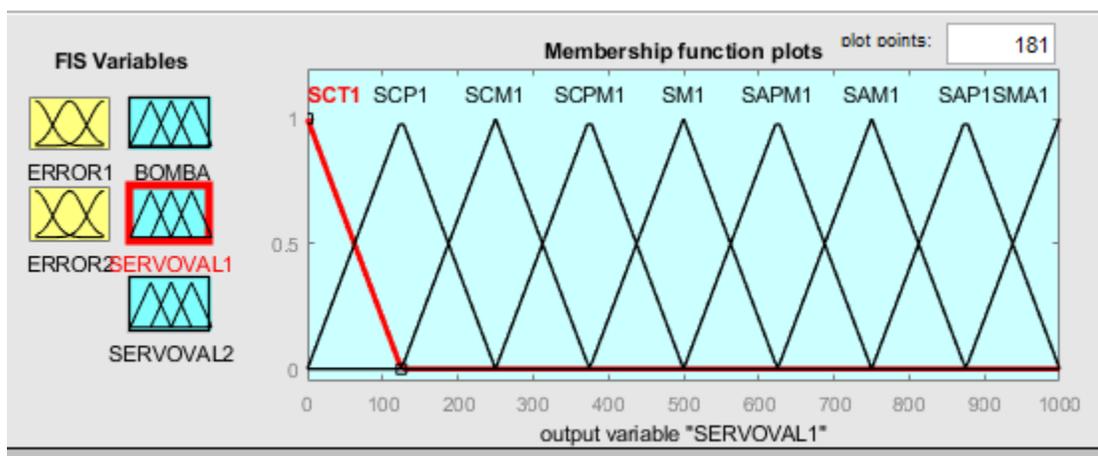
Fuente: Autores.

Salida servoválvulas tanques acoplados.

para el control de las servoválvulas se diseñaron 9 variables lingüísticas las cuales están en un rango de 100 a 800 que son su máximo y mínimo de niveles de apertura y cierre de cada una, las variables lingüísticas utilizadas para cada una de estas fueron para la servoválvula uno se encuentran en la tabla 2-6, las cuales se encuentran en la figura 2-36, para la servoválvula dos se utilizaron las variables lingüísticas que se encuentran en la tabla 2-7, las cuales se encuentran en la figura 2-37.

Tabla 2-6: Términos lingüísticos variable SERVOVAL1.

TERMINOS LINGUISTICOS VARIABLE SERVOVAL1	
ABREVIATURA	NOMBRE
SCT1	Servo cerrada total 1
SCP1	Servo cerrada poco 1
SCM1	Servo cerrada medio 1
SCPM1	Servo cerrada muy poco 1
SM1	Servo mitad 1
SAPM1	Servo abierta muy poco 1
SAM1	Servo abierta medio 1
SAP1	Servo abierta poco 1
SMA1	Servo muy abierta 1

Figura 2-36: Grafica términos lingüísticos SERVOVAL1.

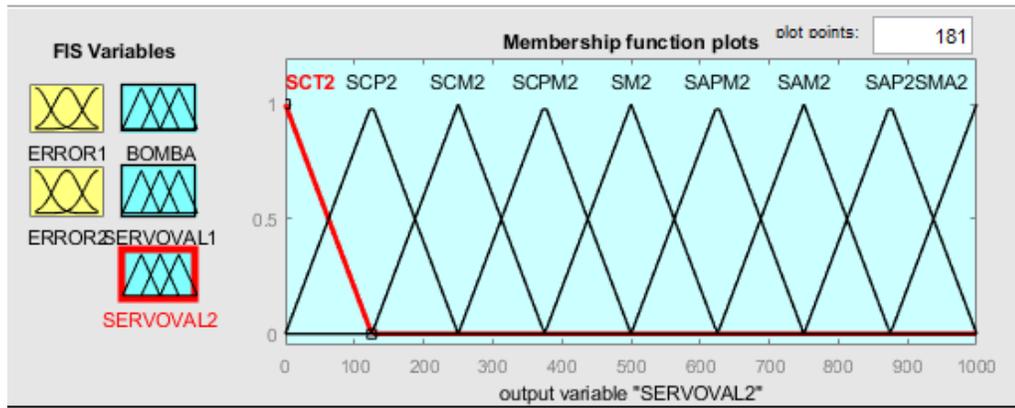
Fuente: Autores.

Tabla 2-7: Términos lingüísticos variable SERVOVAL2.

TERMINOS LINGUISTICOS VARIABLE SERVOVAL2	
ABREVIATURA	NOMBRE
SCT2	Servo cerrada total 2
SCP2	Servo cerrada poco 2
SCM2	Servo cerrada medio 2
SCPM2	Servo cerrada muy poco 2
SM2	Servo mitad 2
SAPM2	Servo abierta muy poco 2
SAM2	Servo abierta medio 2

SAP2	Servo abierta poco 2
SMA2	Servo muy abierta 2

Figura 2-37: Grafica términos lingüísticos SERVOVAL2.

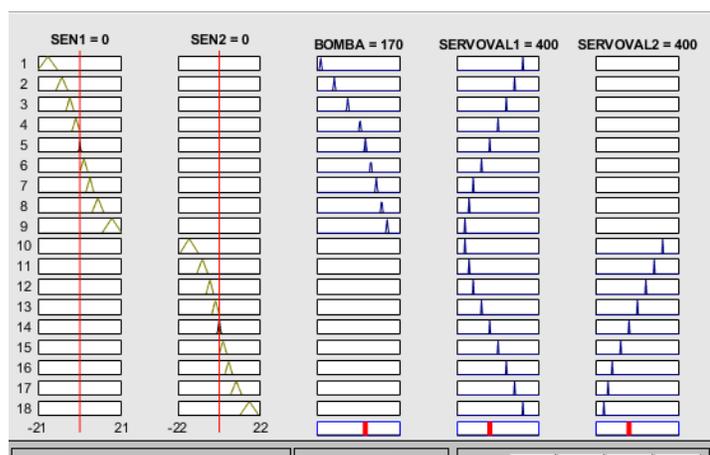


Fuente: Autores.

Reglas de control de nivel tanques acoplados.

luego de tener definidas las variables lingüísticas de cada elemento de entrada y salida del controlador se procede a realizar las reglas de control para proceso estas reglas se definieron en 18 reglas en total para lograr el control de la planta de tanques acoplados en su funcionamiento acoplado en la figura 2-38 se observan las reglas implementadas para su funcionamiento general que es mantener el nivel de líquido en el punto que se desee.

Figura 2-38: Reglas implantadas para el control de tanques acoplados.

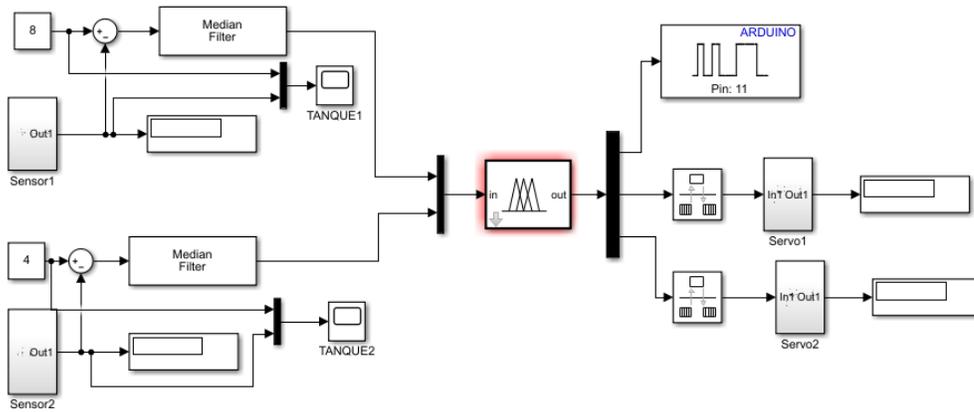


Fuente: Autores.

Diseño en simulink.

Luego de que se tiene el diseño del control para el tanque se procede a aplicarlo sobre el conjunto de elementos en bloques de Simulink en la figura 2-39 se puede observar la unión de bloques que se tienen para la ejecución del control, realizando lectura de los dos niveles de los tanques por medio de los sensores y escribiendo la apertura o cierre a las servoválvulas y la bomba de corriente continua, de igual manera ese control se ejecuta por medio de un toolbox de Simulink denominado fuzzy el cual nos permite tener de forma ya gráfica el objetivo que es el control de los tanques.

Figura 2-39: Diseño Simulink control tanques acoplados.



Fuente: Autores.

2.5 Diseño app en MATLAB.

Para mayor facilidad para el usuario de la planta de control de nivel en tanques acoplados se decidió diseñar una app en el mismo software de Matlab[®]. Esta app permite iniciar, detenerlo, decidir en cuanto se desea tener el nivel de cada uno de los tanques valores en cm; básicamente es un ejecutable de muy comprensible de esta manera no se tiene riesgos de hacer cambios en la organización de los bloques programables de simulink. En la figura 2-40 se muestra la interfaz que se diseñó para cumplir con este objetivo de dar facilidad al usuario el manejo de la planta. Para que esta app funcione el proyecto debe encontrarse en una sola carpeta organizado y así el ejecutable corre de una manera rápida y eficaz.

Figura 2-40: Interfaz gráfica APP

Fuente: Autores

En la interfaz de la app se encuentra un botón de INICIO el cual nos da inicio al programa de control para el sistema, al iniciar el sistema va a iniciar a acorrer el software diseñado en Simulink y abrirá dos ventanas las cuales son los gráficos donde se puede evidenciar el comportamiento del control de la planta, de la misma forma se tiene un botón de SALIR que nos detiene el programa del sistema de control.

La interfaz cuenta con dos casillas editables para ingresar el nivel de líquido que se desea en cada uno de los tanques como este etiquetado tanque uno y tanque dos respectivamente, el dato es ingresado en cm lineales para que el dato sea enviado al software de simulink luego de escribirlo se selecciona el botón ENVIAR DATO respectivamente del nivel que se desee cambiar.

2.6 Implementación y verificación de funcionamiento

En esta sección se quiere mostrar los resultados finales que se han tenido con el diseño e implementación del sistema de nivel de tanques acoplados.

2.6.1 Planta de control de tanques acoplados

A continuación, en la Figura 2-41 se muestra la planta con todo el acondicionamiento necesario para su funcionamiento, el tanque que se observa en la parte superior es el tanque número uno el acoplado siguiente por medio de la servoválvula uno es el tanque número dos y finaliza con una servoválvula al tanque base, la parte de abajo negra es el

tanque de base para realizar el surtido a los tanques superiores, los tubos de color blanco con llaves negras y rojas nos permiten realizar perturbaciones a nuestro sistema.

Figura 2-41: Planta Final Instrumentada



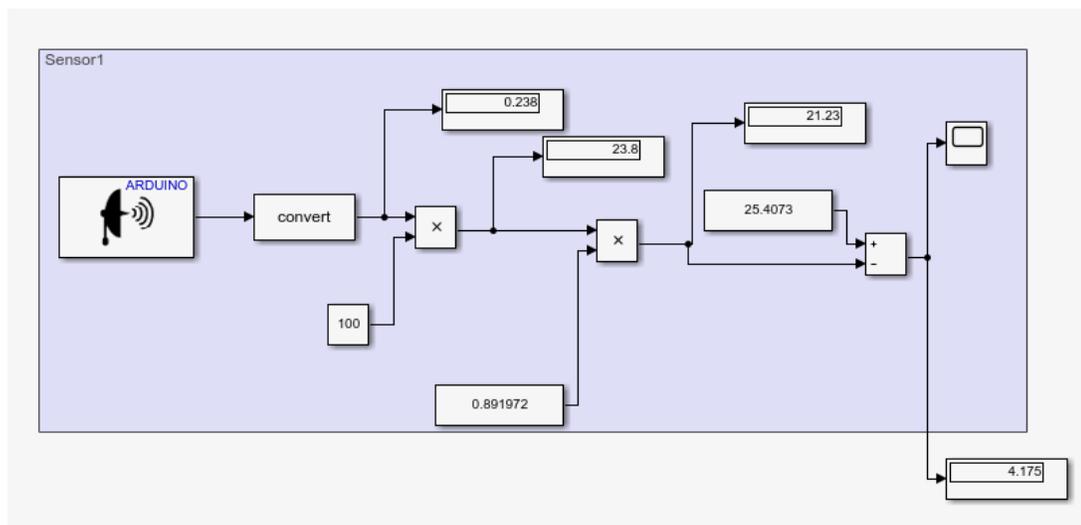
Fuente: Autores.

3. Capítulo 3: Resultados y Análisis.

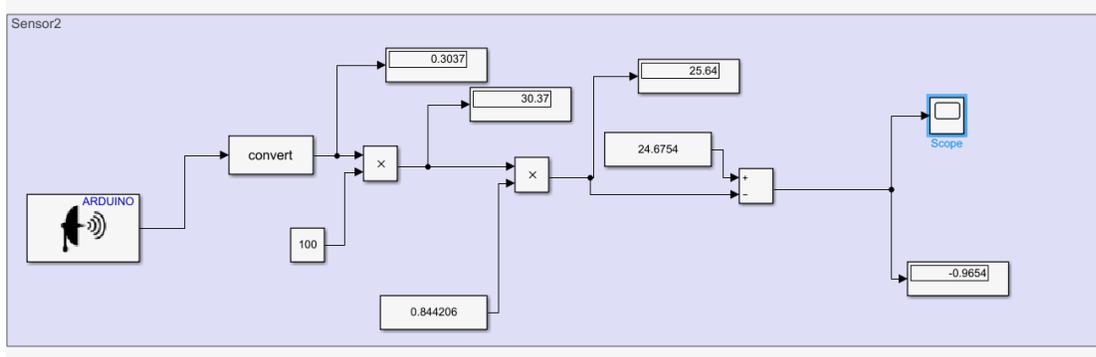
3.1 Lectura Nivel Sensores De Ultrasonido

Para implementar y obtener la lectura del sensor después de tener las ecuaciones de la linealización que se encuentran en sección (2.3.2), de cada uno de los sensores se realizan los bloques de adecuación en el software para que como salida tengamos el nivel en cm lineales, en la figura 3-1 y figura 3-2 se muestra la configuración que se realizó en el software para la lectura de los sensores respectivamente, con cada uno de sus bloques funcionales y operacionales para el objetivo que es leer el dato del nivel de cada tanque en entregándolo al final en cm lineales. En esta configuración los sensores se leen por medio del toolbox de Arduino con la caja del sensor que ya viene disponible en el paquete de Simulink, se le aplican bloques operacionales de multiplicación, resta y operación de constantes para ingresar las variables de la ecuación de la recta.

Figura 3-1: Lectura sensor uno desde Simulink

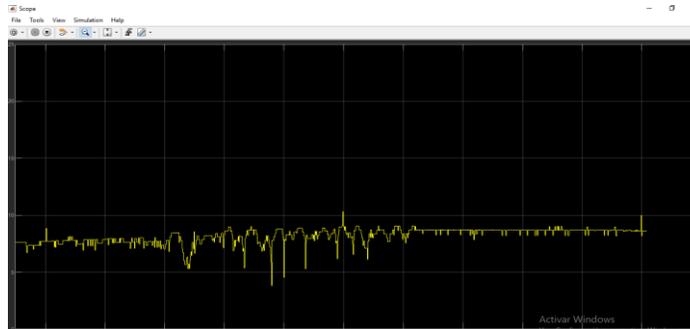


Fuente: Autores.

Figura 3-2: Lectura sensor dos desde el software.

Fuente: Autores.

En la figura 3-3, y figura 3-4 se muestra una gráfica en la cual se encuentra el resultado de la lectura de los datos de cada uno de los sensores respectivamente, en estas graficas se observan las variaciones de subida o bajada que tiene el líquido y como el sensor las detecta y grafica la medida en cm.

Figura 3-3: Grafica medida sensor tanque superior

Fuente: Autores

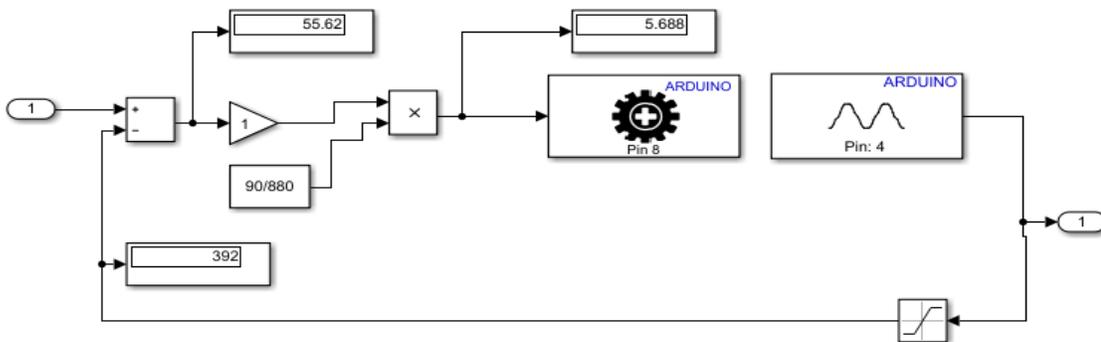
Figura 3-4: Grafica medida sensor tanque inferior

Fuente: Autores

3.2 Servoválvula en Matlab

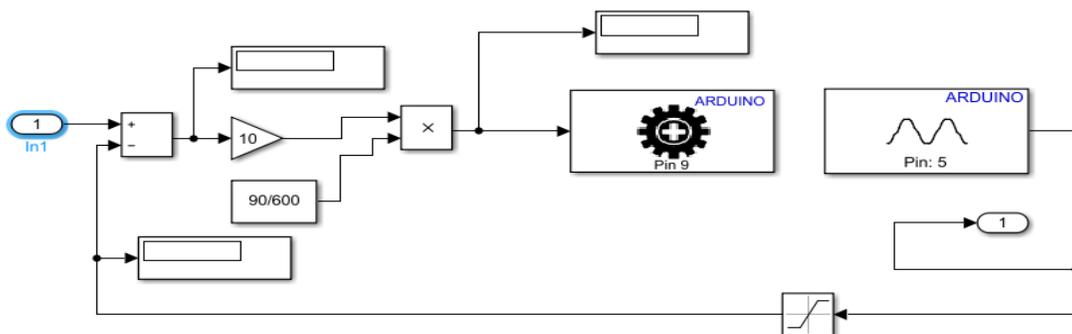
Para la tener una apertura y cierre de cada servoválvula de una manera controlada se implementó en el software una lectura analógica que corresponde a la lectura del potenciómetro para tener conocimiento y control sobre el lugar de donde está la servoválvula con respecto a su cierre y apertura, también encontramos el bloque de escritura PWM sobre el servomotor para el giro de los piñones y pistón de apertura y cierre de la válvula, en la figura 3-5, y figura 3-6 se encuentran el diseño implementado en el software para lograr el control de cada una de las servoválvulas, cada uno tiene una ganancia diferente en la entrada del PWM, este control proporcional se realiza para que la servoválvula llegue a estabilizarse en su dato final

Figura 3-5: Configuración servoválvula tanque uno.



Fuente: Autores

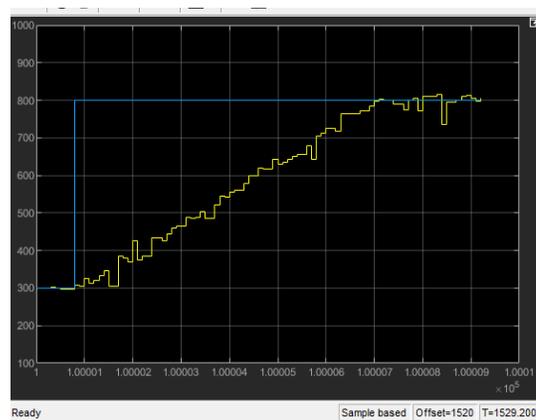
Figura 3-6: Configuración servoválvula tanque dos



Fuente: Autores

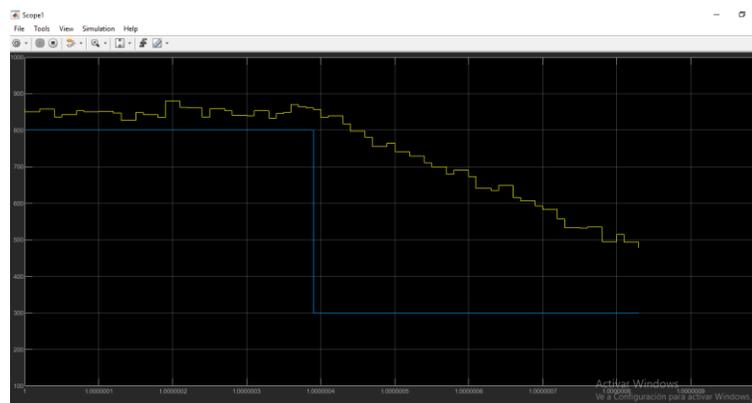
En la figura 3-7 y figura 3-8 se encuentra la gráfica del resultado de estabilización de cada uno de las servoválvulas teniendo cada una como entrada un valor diferente respectivamente, cada una de ellas manejan un rango de cierre de 200 ohm y 800 ohm, estos datos como nombrado anteriormente esta dados por el potenciómetro que es el que nos permite generar este control de tal manera que realmente estos instrumentos tengan un control y no sea un control on/off el cual no es una aplicación para este tipo de prácticas en las cuales necesitamos conocer posiciones y en las cuales se desea controlar cuanto el operario necesita de apertura o cierre de cada elemento de la planta.

Figura 3-7: Grafica estabilización servoválvula uno



Fuente: Autores

Figura 3-8: Grafica estabilización servoválvula dos



Fuente: Autores

3.3 Control bomba de corriente continua

Para poder realizar el control de la bomba DC la cual se encuentra ubicada en el tanque de la base de la planta, esta bomba nos permite el llenado del tanque uno y ya que se cuenta con la bomba DC se le puede realizar un control de caudal proporcional al deseado a través de un control fuzzy, esta bomba cuenta con un rango de 160 – 255 bits para que logre llevar el agua desde la base al tanque uno contando la altura y fuerza que tiene que hacer esta sección en hardware se realizó contando con puente H y el control por software se realiza aplicándolo con un bloque configurable en el software de MATLAB®, en la figura 3-11 se muestra el bloque configurable que se utilizó en el software para obtener este objetivo. En la sección 2.5 de este texto se encuentra la explicación de la configuración que se le realizó al control fuzzy de este elemento.

Figura 3-9: Bloque configuración bomba DC



Fuente: Autores.

3.4 Control de la planta de nivel de líquidos en tanques acoplados

En esta sección se encuentra el resultado del control completo de la planta con sus respectivas gráficas, primero se realizó un control independiente de cada uno de los tanques de manera independiente y luego de una manera conjunta para el control del sistema por completo esto se realizó con el fin de evidenciar y complementar que el sistema se pueda ejecutar desde el control de cada uno de los tanques y finalmente todo un conjunto.

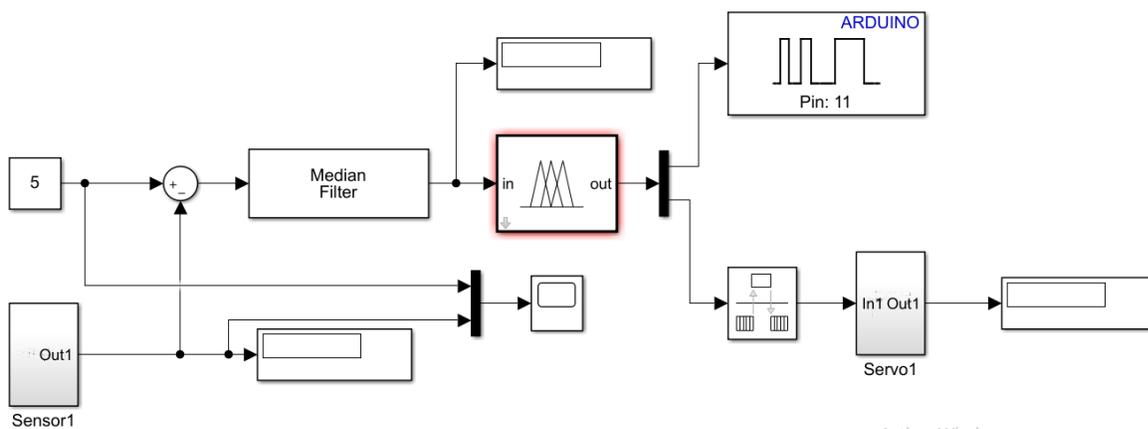
Control tanque uno.

Para el control de nivel en el tanque uno, se controló la bomba de 12v y la servoválvula número uno, los bloques en implementados en Simulink para el control de esta sección de la planta se pueden ver en la figura 3-10, como entrada del controlador se tiene el diferencial entre el valor deseado por el usuario y el valor leído por el sensor en tiempo real luego de que se tenga este valor diferencial se ingresa al toolbox de fuzzy, que viene en la librería de Simulink este toolbox nos toma el dato de entrada y cumple con las reglas que se le hayan dado para que evidencie como resultado la salida de las variables lingüísticas antes presentadas en el capítulo 2.6, luego de que los datos pasan por el controlador se presentan a la salida en este caso son dos un dato para la bomba de corriente continua y otro dato para la servoválvula uno.

El dato de la bomba de corriente continua se ejecuta desde la caja de configuración PWM de Arduino, y el dato de la servoválvula va dirigido a la configuración de lectura y escritura que se diseñó para el manejo automático de las servoválvulas.

En la figura 3-11 se ilustra la gráfica de resultado cuando el nivel se encuentra en 5cm y el usuario desea tener el nivel en 9cm, esta grafica nos muestra el comportamiento del sistema hasta que llega a su estabilización, y en la figura 3-12 se evidencia por medio de una fotografía a la planta física que si efectivamente el sistema logro estabilizarse en el dato que se desea.

Figura 3-10: Diagrama simulink control tanque uno



Fuente: Autores

Figura 3-11: Grafica de resultado control tanque uno

Fuente: Autores

Figura 3-12: Fotografía tanque uno estabilizado.

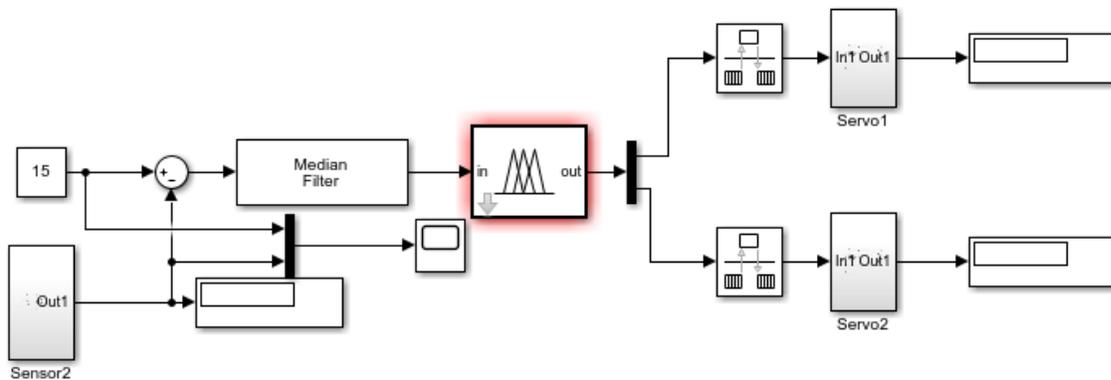
Fuente: Autores.

Control tanque dos.

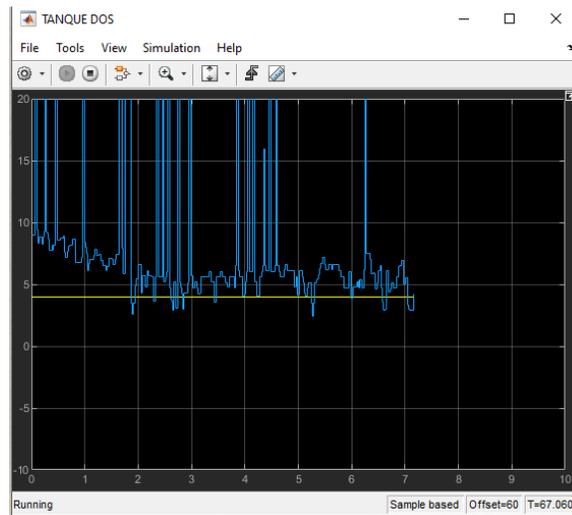
Para el segundo tanque también se realizó un control independiente teniendo control de las dos servoválvulas simultáneamente, esto con el fin de que la entrada de este tanque viene de la servoválvula uno y su salida depende de la servoválvula dos, este control es para que este tanque funcione de manera independiente al tanque uno. En la figura 3-13 se muestra el diagrama de bloques en Simulink con el cual se desarrolló el control de este tanque, al igual que en el tanque uno encontramos como entrada del controlador el diferencial entre el dato leído por el sensor y el dato que el usuario ingresa para la estabilización del nivel, luego de tener este dato ingresa al toolbox de fuzzy de Simulink para poder ejecutar las reglas implementadas para el control de estas reglas que se encuentran en el capítulo 2.6, luego de pasar por el controlador obtenemos dos salidas una para la servoválvula uno y la otra para la servoválvula dos, cada una va hacia su diseño de lectura y escritura para que logren estabilizar el tanque en el valor deseado.

En la figura 3-14 se ilustra la gráfica de resultado cuando el nivel se encuentra en 13 y el usuario desea tener el nivel en 4, esta grafica nos muestra el comportamiento del sistema hasta que llega a su estabilización, y en la figura 3-15 se evidencia por medio de una fotografía a la planta física que si efectivamente el sistema logro estabilizarse en el dato que se desea.

Figura 3-13: Diagrama en simulink control tanque dos



Fuente: Autores

Figura 3-14: Grafica de resultado control tanque dos

Fuente: Autores

Figura 3-15: Fotografía tanque dos estabilizado.

Fuente: Autores

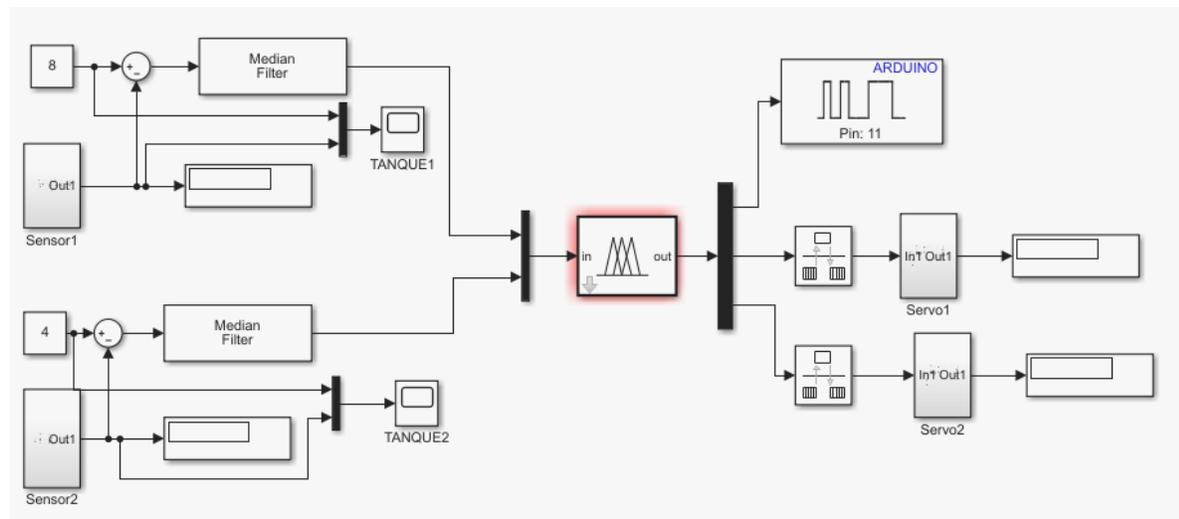
Control dos tanques acoplados.

Luego de que se tiene el control de los tanques de manera individual se procede a desarrollar el control simultaneo para toda la planta de tal manera que los dos tanques trabajen y se estabilicen en sus niveles asignados cada uno aplicando técnicas de control difuso, esto quiere decir que partiendo desde la experiencia del operario para que este genere las variables lingüísticas correctas y nos exprese cada cuanto debe abrir o cerrar

cada válvula para que los tanques tengan un funcionamiento enlazado y logren estabilizar estos valores al valor real lo máximo que sea posible. En la figura 3-16 se muestra el diagrama que se conjuntó en simulink en el cual se evidencia el control de los tanques, donde se observa las lecturas del nivel por medio de los sensores de ultrasonido y estos valores hacen un diferencial con el valor que se desea establecer por parte del usuario el nivel de cada uno de los tanques estos dos datos ingresan al toolbox de Fuzzy para cumplir las reglas que se han registrado y descrito en el capítulo 2.6 dando como resultado tres salidas, una para la bomba de corriente continua que es enviado el dato por medio del bloque de PWM de Arduino, y las salidas a los conjuntos de servoválvulas que tienen sus configuraciones para buscar la posición de apertura o cierre según sea necesario.

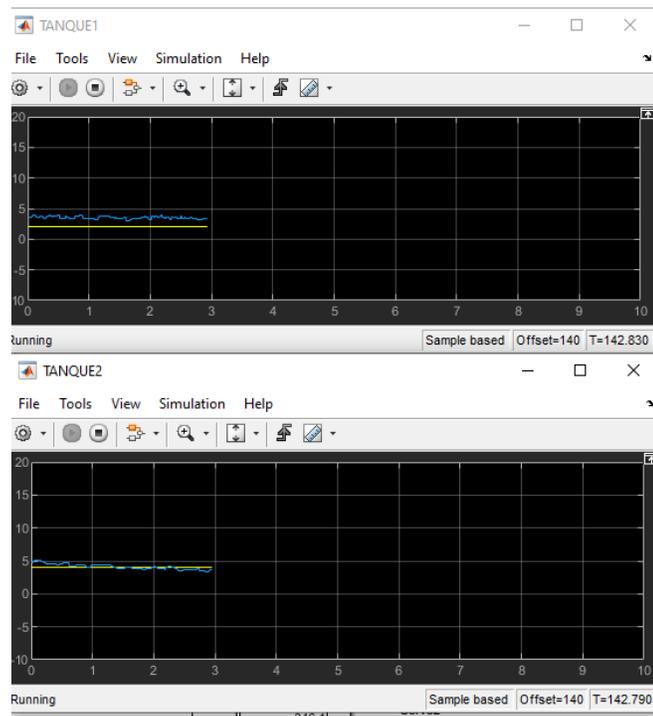
En la figura 3-17 se ilustra la gráfica de resultado cuando el nivel se encuentra en tanque uno esta a 3cm y en tanque dos se encuentra a 4 cm en esta grafica se observa la estabilidad del sistema, el usuario pide que el tanque uno suba a 5 cm y el tanque dos a 6 cm en las figuras 3-18 y 3-19 se muestra como el sistema va cambiando el nivel para llegar a una diferencia de casi cero y estabilizarse en el nivel que le usuario desea. Conjuntamente en la figura 3-20 se evidencia por medio de una fotografía a la planta física que si efectivamente el sistema logro estabilizarse en el dato que se desea.

Figura 3-16: Control dos tanques simulink



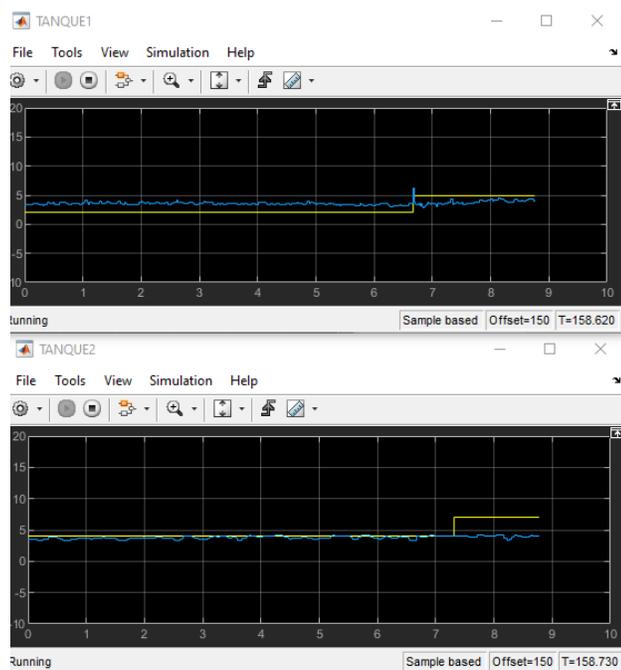
Fuente: Autores.

Figura 3-17: Grafica salida del control tanques acoplados

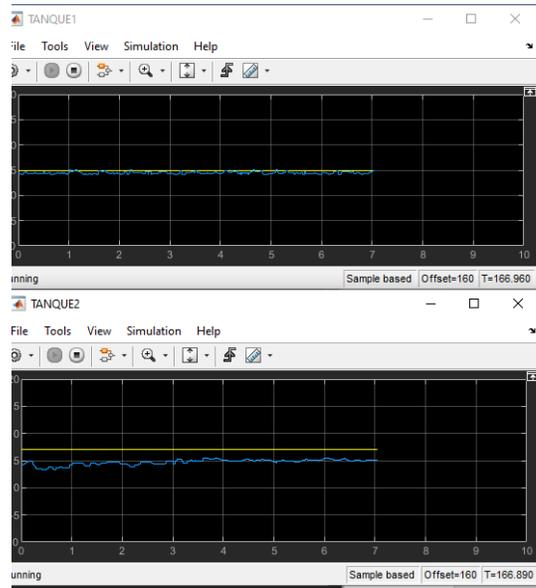


Fuente: Autores.

Figura 3-18: Graficas con cambio de nivel en tanque uno y dos.



Fuente: Autores.

Figura 3-19: Tanques estabilizados en el valor estipulado por el usuario

Fuente: Autores.

Figura 3-20: Fotografía de tanques acoplados estabilizados.

Fuente: Autores.

3.5 Manejo de app en Matlab

Para mayor facilidad para el usuario de la planta de control de nivel en tanques acoplados se decidió diseñar una app en el mismo software de Matlab[®], esta app permite iniciar, detenerlo, decidir en cuanto se desea tener el nivel de cada uno de los tanques valores en cm; básicamente es un ejecutable de muy comprensible de esta manera no se tiene riesgos de hacer cambios en la organización de los bloques programables de simulink. En la figura 3-18 se muestra la interfaz que se diseñó para cumplir con este objetivo de dar facilidad al usuario el manejo de la planta. Para que esta app funcione el proyecto debe encontrarse en una sola carpeta organizado y así el ejecutable corre de una manera rápida y eficaz.

Figura 3-21: App en Matlab.



Fuente: Autores

4. Conclusiones y Recomendaciones.

4.1 Conclusiones

- Cuando hablamos de control encontramos varios métodos de control como lo es el control clásico, control moderno y control no convencional, en el control clásico uno de los inconvenientes al ser implementado en plantas como la que se desarrolló en este proyecto es obtener su modelo matemático exacto y adecuado para que el funcionamiento sea correcto, ya que estos sistemas son no lineales. En el control moderno hacer el modelamiento de estos sistemas es de mayor factibilidad ya que este tipo de control permite el trabajo de como el operario controla la planta manualmente, esta técnica permitió que en el control de la planta se cumpliera el objetivo el cual es mantener el nivel deseado en cada uno de los tanques.
- Este trabajo nos permitió tener el contacto y el manejo de diseñar un controlador difuso para un sistema real, y aplicativo a varias áreas de la tecnología en este caso de una manera académica y dando paso al conocimiento de áreas industriales.
- Con la implementación de esta planta se contribuye a que los estudiantes realicen prácticas de laboratorio de control difuso y control tradicional, vinculando los conocimientos adquiridos por la universidad.

- En este proyecto también se aplicaron ideas en el área de diseño mecánico y electrónico como lo es el diseño de la servoválvula, estos elementos los encontramos en el mercado de una manera industrial teniendo un costo elevado para poder acceder para la realización de prácticas académicas, pero se buscó la solución de desarrollar un modelo funcional, práctico y económico para que el área académica se pueda utilizar en varios proyectos.
- En este proyecto se aplicaron nuevas técnicas de conocimiento, con el fin de incentivar la investigación dentro de la universidad Antonio Nariño.
- Durante el desarrollo de la planta se tuvieron ciertos inconvenientes frente al procesador que se necesita para que el sistema de control funcione de una manera eficientemente rápida, llegando a la conclusión que este tipo de plantas necesitan un procesador de alta capacidad para que su funcionamiento sea rápido y exacto, a pesar de las limitaciones frente a tener un procesador único para el sistema se logró obtener la máxima exactitud en medida de nivel del líquido en los tanques.

4.2 Recomendaciones

- Dar el debido uso adecuado siguiendo el manual técnico y el manual de usuario.
- Elaborar prácticas de control con el fin de promover la investigación de diversos sistemas de control que se puedan aplicar.
- Con el fin de promover la conservación de los tanques y cada uno de los elementos que componen la planta, se recomienda hacer actividades mantenimiento preventivo después de cada uso.
- No dejar con líquido los tanques debido a que la presión del agua permite que se ocasionen fugas en las uniones o hace que la planta se desgaste y deteriore provocando que los instrumentos de operación a causa de la posible humedad experimenten fallas eléctricas de medición o daños físicos.

- Dar el respectivo cuidado al hardware de programación ya que tiene diferentes conexiones.
- Asegurar que las servoválvulas siempre cuenten con 5v de alimentación independiente.
- Realizar la impresión de los piñones de las servoválvulas en acero inoxidable para practicas más robustas.

**A. Anexo: Manual de usuario del
Diseño y construcción de una planta
de tanques acoplados mediante
técnicas de control difuso.**



planta de tanques acoplados.

Es una planta la cual tiene el control de nivel en dos tanques acoplados, por medio de técnicas de control difuso.

En este manual se da a conocer al usuario la forma como funciona el sistema de manera parcial e integrada, el lector obtiene una explicación minuciosa de calibración de sensores, servoválvula, bomba de entrada, dando de una manera a conocer como interactuar con la planta para que conozca su funcionamiento y así mismo pueda conocer sobre las técnicas de control difuso aplicadas en este modelo.

La planta de tanques acoplados cuenta con una estructura lo suficientemente rígida para contener todos los componentes mecánicos y electrónicos, para el funcionamiento de la medición del nivel de líquido en cada uno de sus tanques. Este diseño de planta permite tener cambios como modificación en sensores y en el tamaño y capacidad de los tanques.

De la misma manera se plantean las posibles fayas que pueda tener la planta y opiniones en su solución, para poder mantener la planta con un correcto mantenimiento.

- **HARDWARE:**

la planta de tanques acoplados cuenta con diseño el cual es robusto y dinámico capaz de involucrarse de manera didáctica, de la planta siempre debe encontrarse en una superficie fija y plana, de igual manera el tanque de la parte inferior o tanque base debe contener mínimo 2 litros de agua para que pueda tener abastecimiento para el funcionamiento.

Esta planta cuenta con varios dispositivos para su funcionamiento los cuales son:

2 sensores de ultrasonido

2 servoválvulas

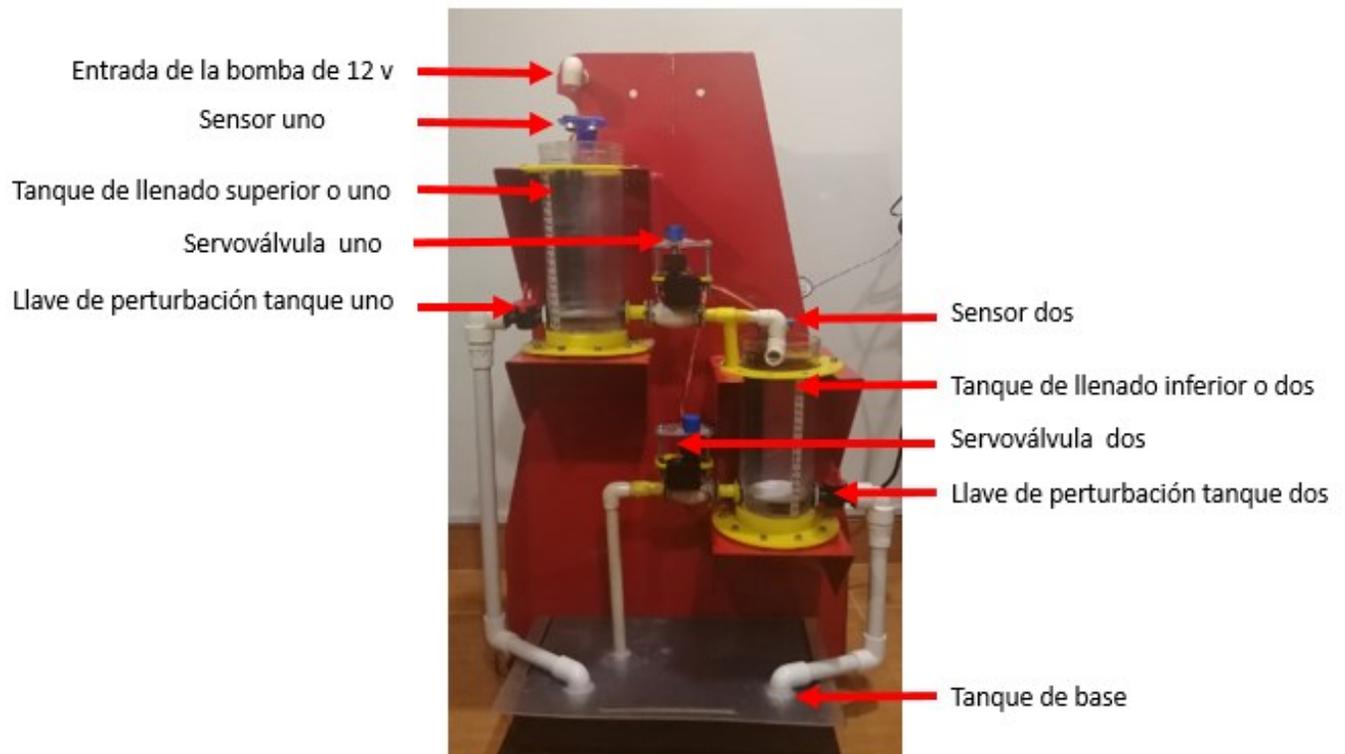
2 llaves de perturbación

1 fuente conmutada de voltaje 12V-10A – 120W DC

1 tarjeta Arduino Due

- 1 bomba 12 v dc
- 1 driver puente h ln298n
- 1 módulo shield para Arduino (diseño propio)
- 1 módulo lm25096 12v a 5v
- 2 tanques
- 1 tanque base
 - 1 estructura de sostenimiento

- **PARTES DE LA PLANTA DE CONTROL DIFUSO**

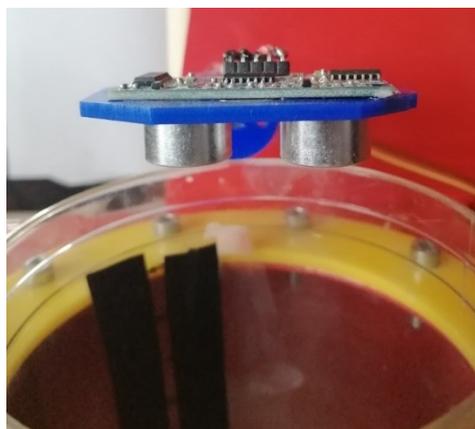


- Servoválvula: las encontramos en la parte final de cada uno de los tanques, estas nos permiten mantener el nivel de agua en cada uno de los tanques y se estabilicen en los niveles deseados.
- Llave de perturbación: cada uno de los tanques tiene una llave de perturbación independiente cada una la cual tiene un caudal superior al caudal de entrada.

- Sensores de ultrasonido: cada uno de los tanques tiene un sensor ultrasonido en la parte superior de cada tanque como se observa en la imagen anterior, este sensor nos permite medir y conocer en cual nivel se encuentra cada uno de los tanques.
- Tanques de llenado: la planta tiene dos tanques para su llenado los cuales, están medidos en cm para que se conozca su nivel este está dado en cm.
- Tanque base: en este tanque tiene la capacidad de almacenamiento para el llenado de los tanques de medición.
- Bomba 12v dc: esta bomba se encuentra ubicada dentro del tanque base, para el control de esta bomba se hace a través de un PWM.
- **CONTROLADOR**

El controlador de la planta para el nivel de líquidos se realizó en el software de Matlab® en la imagen siguiente se observa las partes del controlador para que este funcione correctamente debemos tener en cuenta unos puntos específicos los cuales son.

- Sensor ultrasonido: para que el sistema funcione correctamente, se debe verificar que los sensores estén tomando bien la lectura de los datos, de no ser así en el apartado del libro encontramos como linealizar cada sensor.



- Servoválvula: para el funcionamiento correcto de la servoválvula hay que tener ciertos puntos en cuenta:



- Tener en cuenta cuanto está cerrando y abriendo esta medida se toma dependiendo del potenciómetro que se encuentra en la parte, si el servomotor supera estos valores los cuales están calibrados entre 200 ohm y 800 ohm la válvula puede cerrarse con fuerza y se debe calibrar de nuevo, de la misma manera si su apertura es demasiada.
- Los piñones deben estar alineados y al mover uno el otro también tiene que girar de no ser así ajustarlos retirando solo la tapa superior transparente para poder ajustar los piñones, estos piñones son elaborados en MDF de alta resistencia, la planta cuenta con dos juegos de piñones extras, si se llega a dar el caso de deterioro de uno de ellos.
- No dejar la planta con agua porque puede sufrir fugas ya que por el material de las válvulas puede generarse un filtrado de agua.

Tarjeta de adquisición de datos: la planta contiene una tarjeta depara la comunicación de la planta con el equipo para desarrollar el controlador en software de Matlab®, esta tarjeta es un Arduino Due, el cual permite un procesamiento adecuado para las tareas que se desarrollan con los instrumentos.



Software: el software en el que se desarrolló el controlador fuzzy para la planta de tanques acoplados, es Matlab® en la versión R2018B el software puede ser ejecutado en esta versión o superiores, para la interacción directa con el usuario se desarrolló una APP en el mismo software para que su ejecución del control fuera de una manera más comprensible para un usuario que no tenga una relación fluida con el software, a continuación, podemos ver al interfaz de la aplicación.



Se recomienda que la planta debe desocuparse de su totalidad de agua, cuando no está en funcionamiento para evitar daños de los materiales que la componen.

- **CENTRO DE SERVICIOS**

Para dudas o inquietudes sobre el hardware o software se pueden comunicar al número 3118486630, o al correo electrónico lblanco07@uan.edu.co.

B. Anexo: Manual técnico del diseño y construcción de una planta de tanques acoplados mediante técnicas de tanques de control difuso

En este manual encuentra los circuitos y planos del diseño electrónico y mecánico que se desarrollaron para la planta de tanques acoplados, en los cuales se dan pautas para mantenimiento para un posible daño físico que tenga cada uno de los elementos

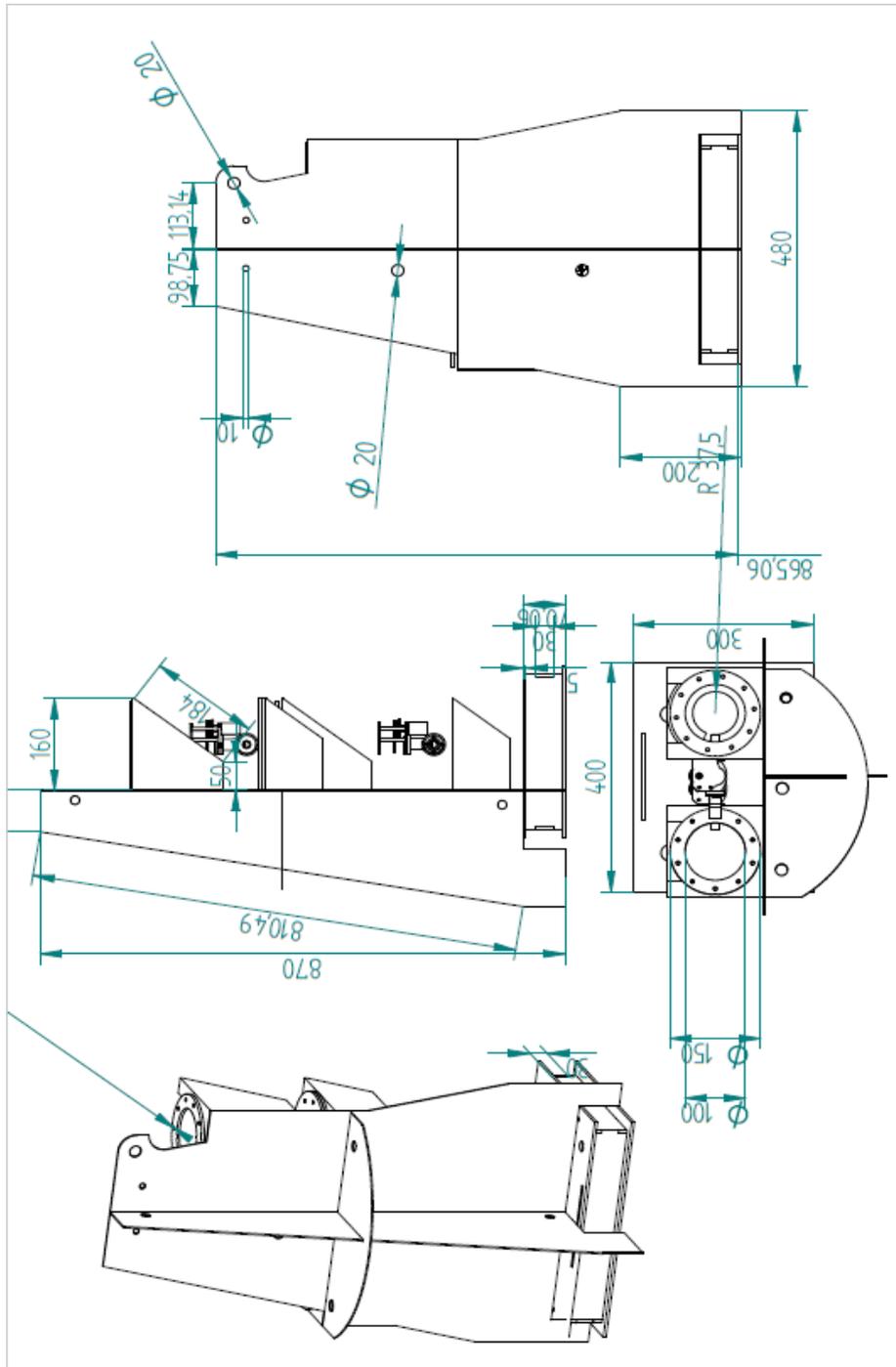
Es importante tener en cuenta cada uno de los requerimientos técnicos expuestos en el manual para de esta forma lograr un correcto funcionamiento del sistema.

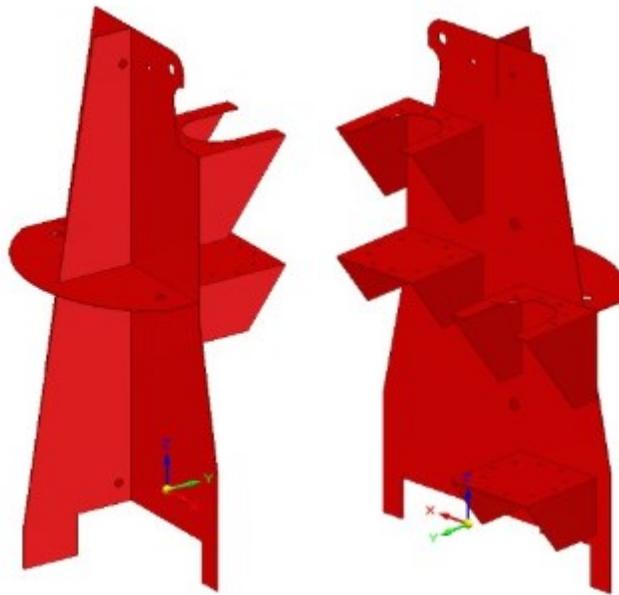
Se describe brevemente y de manera individual cada componente de diseño electrónico y mecánico para conocer sus medidas y dimensiones, por si se desea hacer una modificación física se tenga una base de lo diseñado

Los objetivos de este manual es mostrar los planos diseñados para la estructura de la planta, servoválvula y demás componentes que conforman la planta de control de nivel de líquidos.

- **DISEÑO ESTRUCTURA**

Se realizó un diseño de una estructura cómoda, robusta la cual soporte peso y movimiento. Este diseño fue realizado en software Solid Edge, en la siguiente imagen se pueden apreciar estos planos con sus dimensiones y su vista en imagen 3D.



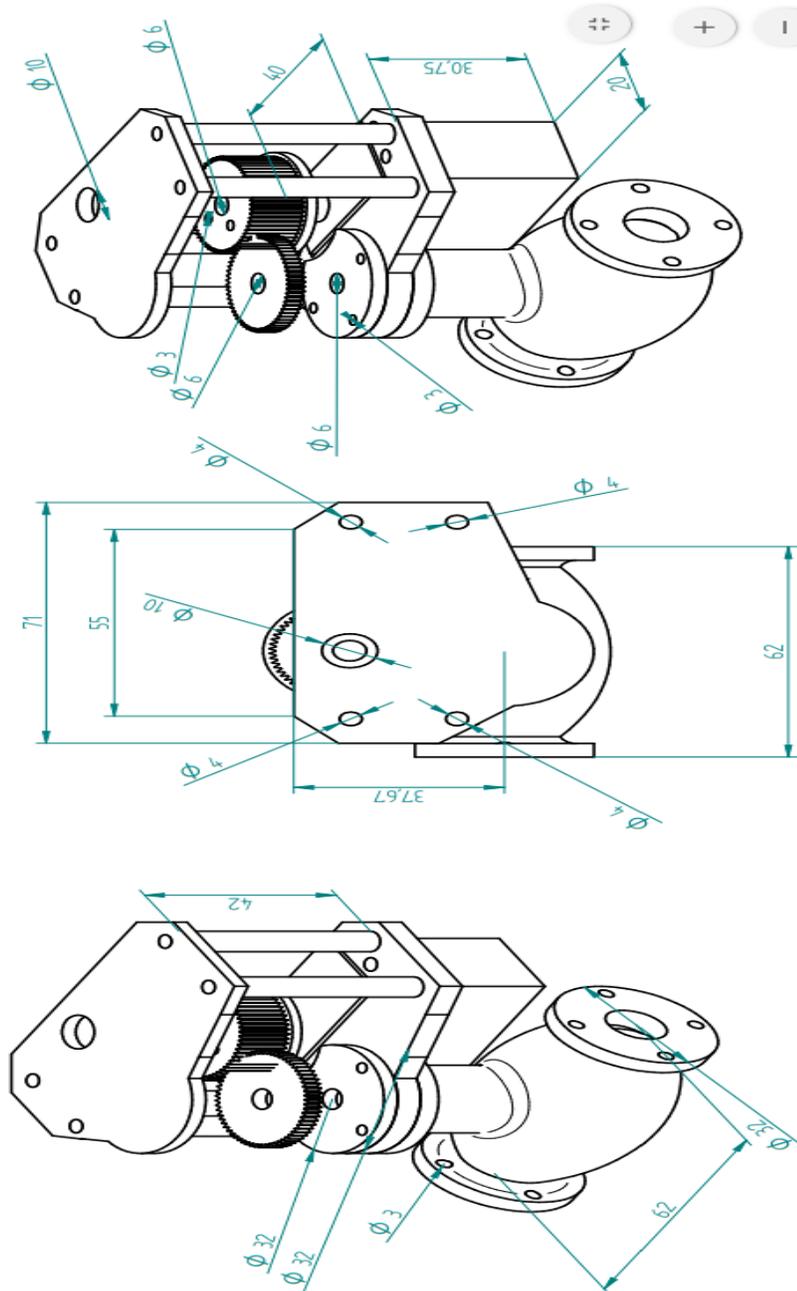


- **DISEÑO SERVOVÁLVULA**

se tomó la decisión de realizar el diseño de una servoválvula propia ya que en el mercado se encuentran tipo industrial, pero no se encontró una servoválvula didáctica con fines académicos.

Esta servoválvula cuenta con el diseño de una válvula tipo globo la cual permite una apertura y cierre en tipo de s esto quiere decir que nos permite controlar la cantidad de caudal que se desea dejar pasar por medio de ella, este control de caudal se realiza con la apertura y cierre de un pistón que va introducido en su interior realizando un movimiento vertical, esto es referente a la válvula; para que el pistón pueda subir y bajar de manera gradual y se pueda realizar el control sobre ella, para poder tener un control proporcional sobre la servoválvula en su totalidad se le hizo una adecuación de un potenciómetro lineal multivoltas en la parte superior para poder saber cuánto es nuestro máximo cierre y nuestra máxima apertura ya que el servomotor que se usó es un servomotor de 360° de infinitas vueltas entonces si lo dejamos sin controlar los rangos podemos sufrir daños en las partes internas de la válvula y los piñones que van adecuados para que el servomotor abra y cierre la válvula.

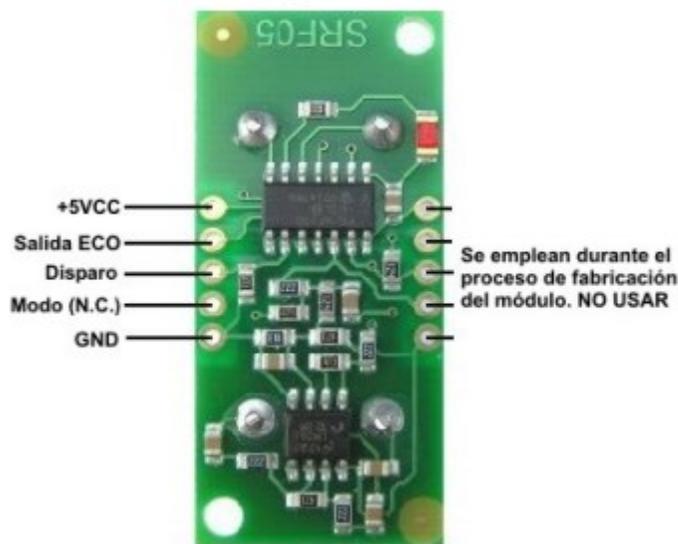
En esta sección se encuentra el modelo del diseño del software Solid Edge con medidas de cada parte diseñada, este diseño lleva los acoples necesarios para los elementos externos que se adecuaron, en seguida está el modelo final ya implementado.





- **SENSORES:**

Los sensores utilizados son sensores de ultrasonido módulo SRF05 ya que estos son sensores de fácil manejo y comprensión por parte de los operarios, este es un sensor que nos permite medir distancias de un objeto, este tipo de sensor mide hasta una distancia de 3 metros como máximo, posee 5 pines los cuales encontramos el pin VCC a 5v, pin ECHO es una entrada la cual es pulso de tiempo que recorre la señal, pin Disparo es una entrada de disparo de inicio cuando hay una nueva medida, pin Modo el cual tiene funciones múltiples en el de echo y de disparo, GND pin de tierra.



- **BOMBA DE SURTIDO 12V DC**

Esta es una bomba la cual tiene un caudal máximo de 400 litros por hora, la bomba de surtido tiene una dimensión de largo 33.1mm, altura 88.2mm, ancho 50.3mm, con una potencia de 36W, con una alimentación de 12v y 36w.



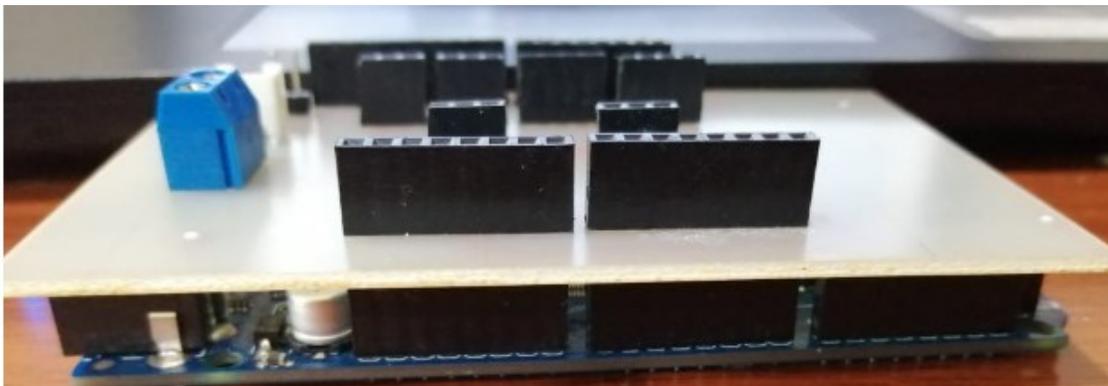
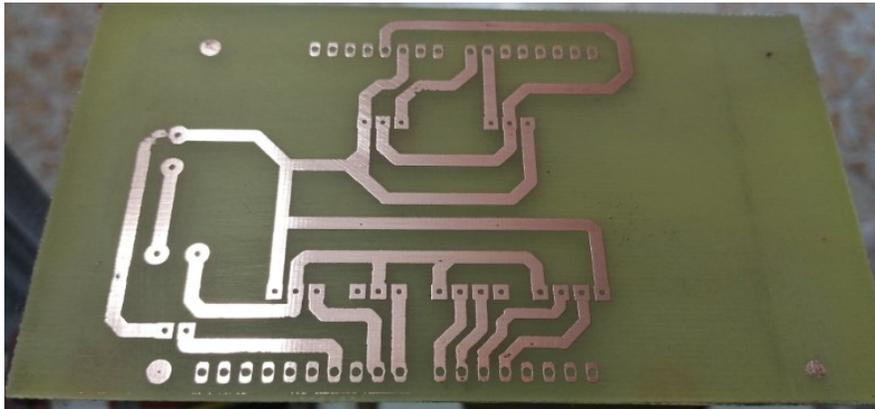
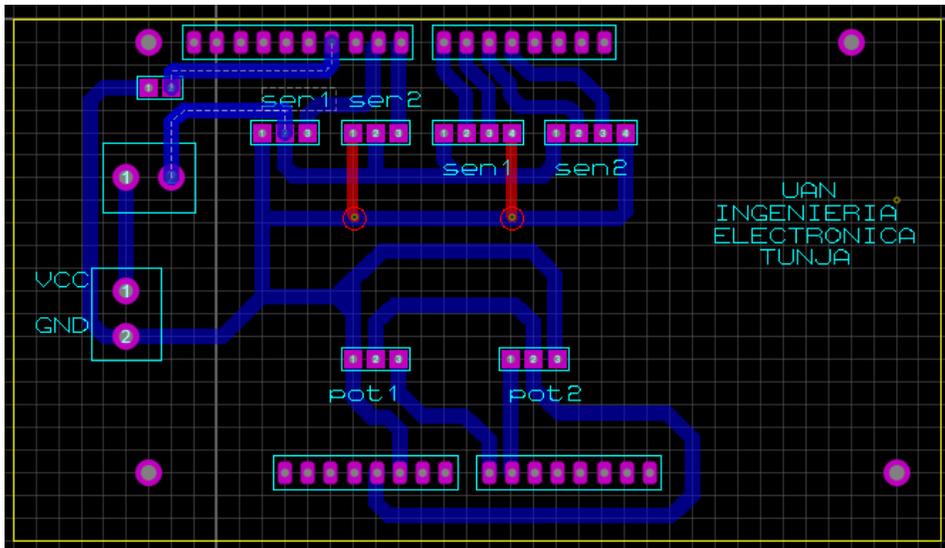
- **TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Para este diseño de esta planta se tomó decidió trabajar con un Arduino Due, por su capacidad en procesamiento el cual nos permite realizar la lectura y escritura en tiempo real de todos los elementos interactivos de la planta de control difuso para el nivel de líquidos.



- **SHIELD DE CONEXIÓN**

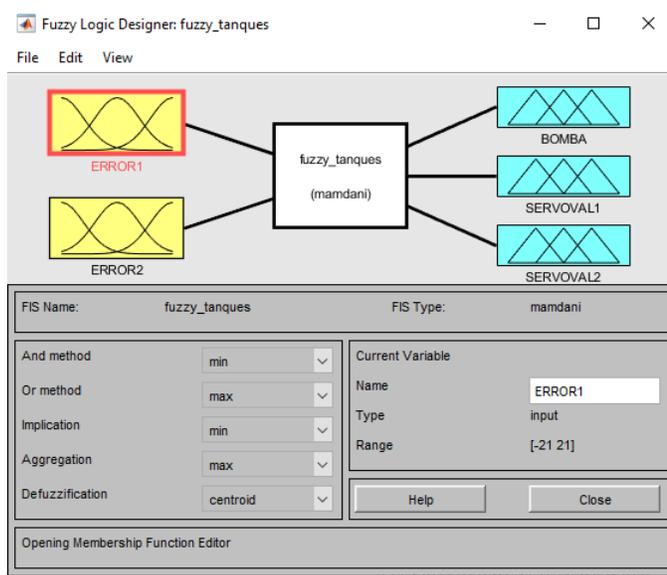
Para la adaptación de las conexiones de los actuadores a la tarjeta de adquisición de datos se realizó el diseño de un shield el cual permite esta función con facilidad, este elemento fue diseñado en software de simulación Proteus, en la siguiente imagen se puede ver el diseño que se realizó en el software, continuada de la imagen de la PCB ya en báquela.



GUIA PRACTICA DE LABORATORIO

Las prácticas a realizar con este sistema de tanques acoplados son:

1. Elaboración de un controlador difuso con tres términos lingüísticos para cada variable mostrada en el controlador mostrado en la siguiente imagen:



Luego de diseñar los términos, plantear reglas difusas consideras para el funcionamiento implementar sobre el Simulink para su funcionamiento. Observar el comportamiento y describir si se logra llegar a los niveles solicitados en la siguiente tabla:

TANQUE UNO		TANQUE DOS	
5 cm		2 cm	
10 cm		6 cm	
18 cm		16 cm	

Repetir el ejercicio con diferentes números de términos lingüísticos necesarios, para lograr obtener los niveles deseados de una manera correcta y describir.

Bibliografía

- [1] K. B. BOHORQUEZ and D. F. F. SANTIAGO GUTERREZ PUERTAS SANABRIA, "SISTEMA DIDACTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL CON TANQUES ACOPLADOS," *Univ. Catol. Colomb.*, vol. 01, pp. 1–115, 2017.
- [2] C. Gaviria, "Modelado y simulación de un proceso de extrusion," no. 2, pp. 1–7, 2007.
- [3] J. A. A. LOZADA and A. M. GRAJALES, *CONTROL Y MEDIDA DE NIVEL DE LIQUIDO POR MEDIO DE UN SENSOR DE PRESION DIFERENCIAL*, no. 45. 2010.
- [4] I. Pressure *et al.*, "Pressure Sensor MPS20N0040D-S," pp. 3–5.
- [5] S. Juan and M. Alberto Pérez Ing Analía Pérez Hidalgo Bioing Elisa Pérez Berenguer, "INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO."," p. 1, 2017.
- [6] "Lógica Difusa Y Sistemas De Control." .
- [7] P. B. E. Tremante, "Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias," *Ing. Ind. Actual. y Nuevas Tendencias*, no. 12, 2014.
- [8] I. J. C. Gomez, "Fuzzy Control Theory," *Control fuzzy*, p. 6, 2008.
- [9] "Tipos de Válvulas y Sus Aplicaciones | TLV - Compañía Especialista en Vapor (América Latina)." [Online]. Available: https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-valves.html?fbclid=IwAR19s_DXTiV9C_xW6bkHCZwVKBDFSm5HN3PjqvBCMxzri xJYlyLC4cMIO18. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [10] "LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS.pdf | Humedad | Entalpía | Free 30-day Trial | Scribd." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/307551240/LABORATORIO-DE-TERMOFLUIDOS-pdf>. [Accessed: 02-Jun-2020].
- [11] Y. Válvulas, "CAPÍTULO 4 : ACCESORIOS." .

- [12] “Bridas :: Bripetrol.” [Online]. Available:
<https://www.bripetrol.com.ar/bridas.html?fbclid=IwAR16ykqgIX5SaWX0ZpED2FEvdd3cSo-oqzUWdICY1Iq-dIJ1GbQJIQPuYn0>. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [13] “MARCO TEORICO SERVOMOTOR Un servomotor también llamado servo es un dispositivo.” [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/p73mq6f/MARCO-TEORICO-SERVOMOTOR-Un-servomotor-tambi%C3%A9n-llamado-servo-es-un-dispositivo/>. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [14] “Fuzzy Logic Toolbox - MATLAB.” [Online]. Available:
<https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>. [Accessed: 31-May-2020].