



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE MEDICIÓN DE NIVELES DE LÍQUIDOS
MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO UTILIZANDO
SENSORES ULTRASÓNICOS**

PRESENTADA POR

**JOSÉ CARLOS HUALPA MEDINA
SAÚL ANTHONY HUBY RODRÍGUEZ**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

LIMA – PERÚ

2016



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada
CC BY-NC-ND**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

**FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE MEDICIÓN DE NIVELES DE LÍQUIDOS
MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO UTILIZANDO
SENSORES ULTRASÓNICOS**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

HUALPA MEDINA, JOSÉ CARLOS

HUBY RODRÍGUEZ, SAÚL ANTHONY

LIMA – PERÚ

2016



Dedicatoria

A nuestros padres quienes siempre nos impulsaron a ser los mejores y a superarnos cada día.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarnos, y continuaron depositando su confianza en nosotros.



Agradecimiento

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad “San Martín de Porres”, por ser nuestra casa de estudios que nos permitieron llegar a ser profesionales.

A nuestros padres por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos han inculcado y por habernos dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestras vidas.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	16
1.1. Antecedentes	16
1.2. Estado del arte global	19
1.3. Situación problemática	20
1.4. Aporte	21
1.5. Bases teóricas	22
1.6. Diagrama de bloques del sistema.	44
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	46
2.1. Materiales	46
2.2. Métodos	52
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL PROYECTO	64
3.1. Diseño de controlador difuso	64
3.2. Diseño de las especificaciones para el tanque de agua	75
3.3. Diseño de captura de datos del sensor ultrasónico	77
3.4. Diseño de servo válvula.	78
3.5. Diseño del micro controlador	80
3.6. Diseño del Prototipo de Planta (Etapa de Ozonización)	83
3.7. Diseño de entorno gráfico para la visualización	91
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS	102
4.1. Pruebas a ejecutar	102
4.2. Pruebas a evaluar y controlar	102
CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES	126
FUENTES DE INFORMACIÓN	128
ANEXOS	130

Lista de tablas

		Página
Tabla 1	Medidores de nivel de líquido que existen en el mercado	17
Tabla 2	Plantas embotelladoras en el mundo	20
Tabla 3	Ejemplo de matriz de base de conocimiento	33
Tabla 4	Características de electroválvula	45
Tabla 5	Características de Servomotor	45
Tabla 6	Características del sensor de ultrasonido HC-SR04	49
Tabla 7	Características de bomba de agua	50
Tabla 8	Características del micro controlador Atmega 328	51
Tabla 9	Proceso productivo de fábricas embotelladoras de garrafrones de agua	65
Tabla 10	Componentes para el tanque prototipo	75
Tabla 11	Pruebas de lectura de distancia	103
Tabla 12	Mediciones del sensor ultrasónico	104
Tabla 13	Mediciones obtenidas en tanque a medio llenar	105
Tabla 14	Mediciones de distancia y tiempo de espera de la señal rebotada	106
Tabla 15	Error introducido por redondeo	108
Tabla 16	Promedio de muestras vs. Promedio del controlador	110
Tabla 17	Resultado en promedio de tiempos de llenado	112
Tabla 18	Toma de medidas de tanque simulando 100 cm. de altura	115
Tabla 19	Respuesta del controlador difuso ante el apagado de la bomba de agua por el sensor de ángulo de giro	117
Tabla 20	Datos obtenidos por el controlador vs. Datos obtenidos por medición con regla	118
Tabla 21	Promedio de muestras vs. Promedio del controlador	118
Tabla 22	Error obtenido vs. Error admitido	119
Tabla 23	Respuesta del controlador difuso	121
Tabla 24	Respuesta al controlador difuso con cambios abruptos	123

Lista de figuras

	Página	
Figura 1	Ejemplo de conjuntos difusos	24
Figura 2	Lógica clásica versus lógica difusa	25
Figura 3	Algunas de las funciones de membresía más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) sigmoidal	26
Figura 4	Función de transferencia para un conjunto difuso triangular	27
Figura 5	Función de transferencia para un conjunto difuso trapezoidal	28
Figura 6	Ejemplo de variables lingüísticas	28
Figura 7	Ejemplo de número difuso	29
Figura 8	Complemento de A	30
Figura 9	Unión de A y B	31
Figura 10	Intersección de A y B	31
Figura 11	Estructura de un sistema difuso	32
Figura 12	Ejemplo de fusificación de una variable	34
Figura 13	Área a defusificar	39
Figura 14	Defusificación a través del método centroide o método sugeno	40
Figura 15	Ejemplos gráficos de métodos de defusificación	41
Figura 16	Efecto de ultrasonido frente a obstáculos	42
Figura 17	Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido	43
Figura 18	Margen de error dependiente de la distancia mínima	43
Figura 19	Diagrama de bloques general del proyecto	44
Figura 20	Diagrama de bloques del micro controlador	45
Figura 21	Prototipo de tanque de líquidos	47
Figura 22	Servomotor MG995	49
Figura 23	Pantalla LCD	51
Figura 24	Ejemplo de fusificación	53

Figura 25	Etapa de defusificación	54
Figura 26	Configuración de pines del sensor ultrasónico HC-SR04	55
Figura 27	Diagrama de tiempos del sensor de ultrasonido	55
Figura 28	Funcionamiento del sensor ultrasónico	56
Figura 29	Diagrama de bloques del cálculo de la distancia a través de un sensor ultrasónico	57
Figura 30	Respuesta del sistema en el tiempo	59
Figura 31	Grafica de Giro vs tiempo de activación	59
Figura 32	Respuesta del sistema de la electroválvula	61
Figura 33	Circuito de acondicionamiento para electroválvula	62
Figura 34	Etapas del proceso de embotellamiento de garrafones de agua	65
Figura 35	Diagrama de bloques de la fábrica embotelladora	66
Figura 36	Diagrama de bloque de comunicación entre el controlador difuso, el sensor y la servo válvula	67
Figura 37	Entrada y salida del controlador difuso	69
Figura 38	Funciones de membresía y variables lingüísticas de la variable de entrada	70
Figura 39	Funciones de membresía y variables lingüísticas de la variable de salida	71
Figura 40	Base de reglas	73
Figura 41	Diagrama de bloques de controlador difuso para la presente tesis	74
Figura 42	Base de control de tanque	76
Figura 43	Diagrama de flujo de captura de datos de sensor ultrasónico	77
Figura 44	Diseño de la estructura de la servo válvula	79
Figura 45	Diagrama de flujo del micro controlador	81
Figura 46	Prototipo de planta	83
Figura 47	Prototipo de planta y sus componentes	84
Figura 48	Tanque de agua utilizado para el prototipo: a) Sensor de operación, b) Sensor de protección	85

Figura 49	Pantalla LCD que muestra información básica de capacidad de tanque y distancia	86
Figura 50	Servo válvula acondicionada para la apertura o restricción de líquido al tanque	87
Figura 51	Diagrama de protección del sistema, arreglo 1 +2; 1 sistema principal más 2 sistemas de protección	88
Figura 52	Electroválvulas a) salida de líquidos y b) ingreso de líquidos	88
Figura 53	Fuentes de poder utilizadas en el prototipo: a) 24v, b) 12v	89
Figura 54	Tablero de control de prototipo	90
Figura 55	Bomba de agua usada en el prototipo	91
Figura 56	Diseño final del entorno del operador	91
Figura 57	Diagrama de flujo del control interno del entorno gráfico	94
Figura 58	Diagrama de flujo del controlador difuso	96
Figura 59	Diagrama de clase DotFuzzy utilizado para implementar el controlador difuso	98
Figura 60	Diagrama de flujo de registro del controlador difuso	100
Figura 61	Valores obtenidos por puerto serial	104
Figura 62	Resultados obtenidos con tanque medio lleno	105
Figura 63	Grafica de distancia VS tiempo de espera de rebote de señal	107
Figura 64	Interfaz de operador	11
Figura 65	Simulación de tanque con volumen de 1000 litros y 100 cm. De altura	115
Figura 66	Respuesta del sensor de giro a diferentes mediciones porcentuales de líquido	118
Figura 67	Comportamiento gráfico de sensor de protección por ángulo de giro	119
Figura 68	Pruebas a interfaz de operador	120

Lista de anexos

	Página
Anexo 1: Data sheet del micro controlador Atmega 328	131
Anexo 2: Data sheet servomotor MG995	133
Anexo 3: Características de solenoide (electroválvula)	135
Anexo 4: Imágenes de prototipo de planta simulada	136



RESUMEN

La presente tesis titulada: “Diseño, simulación e implementación de un prototipo de medición de niveles de líquidos mediante técnicas de control difuso utilizando sensores ultrasónicos”, tiene por objeto apoyar a la pequeña y mediana industria de envasado y embotellado de bebidas, de tal manera que se pueda controlar, calibrar y monitorear sus niveles de tanques en el momento de llenado y vaciado generando una ayuda al operario o usuario posibilitando la visualización de todo el proceso.

La presente investigación responde a la observación que se hizo a las pequeñas y medianas industrias de venta de agua, que en la actualidad tienen sistemas de llenado y vaciado de líquido obsoleto, en algunos casos estos procedimientos se hacen de forma manual. Por lo que es necesario usar nuevas tecnologías en estos procesos, en este caso se usará la lógica difusa.

Se observa que con la implementación un controlador difuso en los procesos de llenado y vaciado de líquidos, estos son más rápidos, generan menos costo de producción por no tener un operario que este constantemente revisando niveles de líquido y es acoplable a cualquier tipo de tanque que no sobrepase las especificaciones del controlador.

Finalmente los resultados se observan en una interfaz gráfica que muestra en tiempo real el llenado de líquido en un prototipo, así como un cronometro que da el tiempo de llenado y la generación de un Excel con los tiempos de llenado y vaciado de líquidos.

Palabras claves: Diseño, simulación, medición de niveles, lógica difusa.

ABSTRACT

This thesis entitled "Design, simulation and implementation of a prototype measuring liquid levels using techniques of fuzzy control using ultrasonic sensors", aims to support small and medium industry packaging and bottling beverages, so that you can control, calibrate and monitor tank levels at the time of filling and emptying generating an operator or user assistance enabling visualization of the whole process.

This research responds to the observation made to small and medium industries selling water, which currently have systems very filling and emptying of liquid obsolete in some cases these procedures are done manually. As new technologies must be used in these processes, in this case the fuzzy logic is used.

It is noted that with the implementation diffuse processes of filling and emptying of liquid controller, these are faster, generate less production cost for not having an operator that this constantly checking fluid levels and is attachable to any type of tank does not exceed the specifications of the controller.

Finally, the results are seen in a graphical interface that displays real-time filling liquid into a prototype, and a timer that gives the filling time and the generation of Excel with the times of filling and emptying of liquids.

Key words: design, simulation, measurement levels, fuzzy logic.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria de embotellado de agua mineral tiene mucha demanda, las pequeñas y mediana empresas dedicadas a este rubro se enfrentan con las grandes industrias embotelladoras que cada vez son más eficientes y generan un volumen mayor de botellas comparados con las pequeñas y medianas empresas.

Se observa que las pequeñas empresas dedicadas a este rubro poseen maquinarias obsoletas y en algunas ocasiones utilizan operarios que controlan las maquinarias de forma manual, debido a esto se ve en la necesidad de implementar un sistema inteligente que supla al operario y ejecute los procesos con mayor rapidez, dicho control debe tener la capacidad de acoplarse a diferentes cambios tales como: tipo de líquido, capacidad de tanques y temperatura del líquido, es por ello que se ve en la necesidad de implementar un controlador que sea adaptable y que no genere un mayor costo a las empresas.

Debido a lo mencionado anteriormente se decide crear un controlador difuso que ayude a disminuir el tiempo de los procesos, sea adaptable y no genere mayores costos de producción. La presente tesis está estructurada en cuatro capítulos que mostrarán el marco teórico, análisis y diseño del controlador, así como pruebas realizadas al controlador.

En el primer capítulo se enfoca en el marco teórico para ello analizaremos los antecedentes y generaremos las bases teóricas así como las posibilidades de aplicar esta tesis a la pequeña y mediana industria. En este capítulo se hace un detalle del diagrama general de la tesis haciendo énfasis en cada estructura que compone el diseño.

El segundo capítulo está dedicado al análisis previo del diseño del proyecto tomando en cuenta los requerimientos de hardware como de software para su correcta implementación y puesta en marcha. Se estudiarán los sensores,

micro controladores, comunicación de datos, controladores con métodos de inteligencia artificial (lógica difusa) y entornos de desarrollo de software.

El tercer capítulo trata sobre el diseño general de la tesis, detallando las especificaciones de cada etapa desde la adquisición de datos con el sensor, la tarjeta de adquisición de datos, medios de comunicación de datos, interfaz con el computador, software de desarrollo a usar, el análisis de la funciones de membresía para la el controlador difuso, el análisis de tiempos de llenado para el funcionamiento automático del sistema.

En el cuarto capítulo se muestra la etapa de implementación del diseño tanto de hardware como de software, integrando sensores, tarjeta de adquisición, interfaz con el PC, métodos de visualización como es el programa principal y a su vez el modelo del tanque, y resaltaremos lo importante que es tener muchas precauciones al momento de realizar los montajes eléctricos-electrónicos para evitar daños de hardware incluso hasta fallas a nivel de software; mostraremos las pruebas realizadas, datos obtenidos y análisis de resultados que respaldan este documento.

1. Planteamiento del problema

La problemática de nuestro país revela que las pequeñas y medianas empresas de agua embotellada cuentan con sistemas de producción antiguos y obsoletos, así como operarios que controlan manualmente ciertos procesos productivos, tales como; el control de válvulas, inspección de contenedores, entre otras, y Teniendo en cuenta que los sistemas de producción cada vez son más inteligentes y estando a puertas de la cuarta revolución industrial, se ve la necesidad de implementar sistemas inteligentes que ayuden a los procesos de llenado y vaciado de líquido, para que estos sean rápidos y eficientes, por lo que la presente tesis muestra el diseño de un controlador difuso, el cual ayudará a la industria y mejorará los tiempos de producción así como los ingresos de las fábricas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Controlar el nivel de líquidos con un nivel variable utilizando lógica difusa para el control inteligente en el llenado de líquidos y con visualización en un entorno gráfico.

2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de control de niveles de líquidos orientado al embotellado de productos para la pequeña y media industria.
- Analizar el proceso de control de llenado para que se auto calibre en cada ciclo.
- Implementar un sistema de control difuso utilizando sensores ultrasónicos para el llenado de líquidos.
- Utilizar la inteligencia artificial mediante el control difuso para la mejora del proceso de llenado y medición de nivel de líquidos en la pequeña y media industria.
- Modelar un entorno visual del proceso de llenado y medición de niveles de líquidos.

3. Justificación

El diseño implementado, reúne características, condiciones técnicas y operativas que aseguren el cumplimiento de los objetivos. Así como, su capacidad de ser un instrumento certero, económico y de uso sencillo; y sobre todo, de igual nivel de precisión y de mejor respuesta de control que los equipos que existen en el mercado.

4. Limitación

Debido al tipo de sensor ultrasónico usado en la presente tesis, la altura máxima de los tanques de agua será de 3 metros y un volumen no mayor de 1000 litros, además el sensor debe tener un soporte estable para que las medidas sean exactas y no generen error.

5. Alcances

El proyecto está dirigido a pequeñas empresas que desean disminuir costos y maximizar ganancias, el sistema solo está optimizado para una etapa de todo el proceso de producción, si es que se desea una mejor optimización se podría migrar a un sistema neurofuzzy.

Las demás etapas de producción no están contempladas en este proyecto debido a que sería motivo de más investigación e inclusión de mejores tecnologías tales como las redes neuronales.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

En el siglo XXI, la innovación en tecnologías de la información y de las telecomunicaciones ha avanzado sin descanso. En este contexto, la humanidad se enfrenta al reto de encontrar la manera de trascender las conexiones físicas y electrónicas para superar los sentimientos y sensibilidades de las personas a través de las fronteras entre personas y máquinas.

Debido a este avance tecnológico se ve en la necesidad de crear tecnología que ayude a romper esta frontera tecnológica. En este contexto nace el uso de la lógica difusa que nos permite realizar las funciones de un operador experto que en base a su experiencia permite controlar diferentes tipos de etapas en un proceso industrial.

En la actualidad, el país que hace un uso mayor de esta tecnología es Japón. Este tipo de tecnología se puede apreciar en el tren subterráneo del metro de Sendai en Japón que fue inaugurado en 1987, hasta electrodomésticos de uso diario como ollas arroceras, lavadoras, aspiradoras, termostatos entre otros.

Otros de los usos que se les ha dado a esta tecnología es en la industria automovilística, un claro ejemplo es la compañía NISSAN que patentó una transmisión automática difusa que ahorra combustible de un 12% a 17%. Dado que un automóvil es un conjunto de muchos sistemas: motor, transmisión, freno, suspensión, dirección y más, donde se pueden aplicar, en casi todos los casos un sistema difuso.

Actualmente en las industrias peruanas se hace poco uso de controladores difusos o sistemas inteligentes que ayuden a las empresas a disminuir costos en sus procesos, un ejemplo es la industria de llenado de líquidos en

plantas envasadoras de garrafones de agua. En estas plantas se usa los controladores convencionales que miden el nivel de líquido en los tanques, además estos sensores están en contacto directo con el agua que en este caso es la materia prima de la fábrica.

En la actualidad existe una gran variedad de modelos comerciales de sistemas de medición del nivel de líquidos. Gran parte de estos instrumentos tienen un mejor funcionamiento, cumplen con estándares, cada sistema de medición del nivel de líquidos debe cumplir ciertos estándares de calidad como los otorgados por ATAX, que cumplen con las directivas 1999/92/CE y 94/9/CE, tamaño compacto, fácil de instalar y bajo consumo de corriente.

Muchos de estos instrumentos usan protocolos seriales con conexiones RS-232 que se comunican con un registrador, en la tabla 1 se observa algunos de los sensores de nivel de líquido que actualmente se venden en el mercado.

Entonces la lógica difusa es un tipo de diseño alternativo que se puede aplicar tanto en el desarrollo de sistemas no lineales y lineales, los desarrolladores pueden diseñar controladores de menor costo y de mayor velocidad.

Tabla 1: Medidores de nivel de líquido que existen en el mercado

Instrumento	Campo medida	Precisión % escala	Ventajas	Desventajas	Precio
Sonda	Limitado	0.5 mm	Barato Preciso	Manual, sin olas, tanques abiertos	\$50.00
Cristal	Limitado	0.5 mm	Seguro Preciso	Sin transmisión	\$125.00
Flotador	0 – 10 m	± 1 – 2 %	Simple. Independiente de la naturaleza del líquido	Posible agarrotamiento	\$200.00
Manométrico	Altura de tanque	± 1 %	Barato	Tanques abiertos, Fluidos limpios	\$30.00
Burbujeo	Altura de tanque	± 1 %	Barato, versátil	Mantenimiento, contaminación del líquido	\$52.00

Presión diferencial	0.3 m	±0.15 a 0.5%	Interfaz líquido	Posible agarrotamiento	\$300.00
Conductivo	Ilimitado	-	Versátil	Líquido conductor	\$230.00
Capacitivo	0.6 m	± 1 %	Resistencia a la corrosión	Recubrimiento del electrodo	\$3500.00
Ultrasónico	0.30 m	± 1 %	Todo tipo de tanques y líquidos	Sensible a la densidad	\$150.00
Láser	0 – 2 m	± 0.5 a 2%	Todo tipo de tanque y sin contacto con el líquido	Láser	\$90.00

Fuente: <http://www.industriaynegocios.cl/Academicos/AlexanderBorger/Docts%20Docencia/Seminario%20de%20Aut/trabajos/2001/Alvarez%20Labarca/Medicion%20de%20Niveles>.

Alrededor del planeta la inteligencia artificial (lógica difusa) está siendo utilizada en las industrias, robótica, etc. En la industria es donde se da mayores beneficios y menores costos.

La lógica difusa está en aumento de popularidad en el mundo ya que esta proporciona un potente vehículo a los ingenieros incorporar el razonamiento humano a algoritmos de control, el cual no está basado en modelos matemáticos clásicos.

Los sistemas difusos han sido aplicados a una gran variedad de campos desde el control, procesamiento de señal, comunicaciones, en la fabricación de circuitos integrados, en sistemas expertos para negocios, medicina, entre otros. Sin embargo, la aplicación más significativa se concentró en problemas de control industrial y equipos electrodomésticos.

- Control Difuso de un Horno de Cemento
- Control Difuso de un Tren Subterráneo del metro de Sendai en Japón inaugurado en 1987
- Sistemas Difusos en Automóviles (ejemplo Nissan)
- Estabilizador Digital de Imagen
- Lavadoras Difusas producidos por Matsushita Electric Industrial Company en Japón alrededor de 1990.

1.2. Estado del arte global

Antiguamente el proceso de embotellado se realizaba de forma manual, debido a la gran demanda surge la necesidad de crear maquinaria para hacer esos procesos más rápidos que permitan aumentar el promedio de producción, entre ellas surgieron máquinas semiautomáticas y posteriormente las automáticas que difieren entre sí, en la capacidad de producción.

La industria de la bebida latinoamericana está pasando por una evolución importante en términos de productos ofrecidos y empaque utilizado, esta compañía ha sido forzada a elaborar productos que puedan ser adaptados a diversos requisitos.

Hoy en día la embotelladora más rápida Francisco Vallejo, presidente del consejo de administración de Agua de Bronchales SA, propietaria de la planta, resaltó que disponen de la línea de embotellado más rápida del mundo, con una capacidad de 1.200 garrafas de 19 litros a la hora. El agua se embotella en gran formato y está destinada a domicilios y oficinas. Además la empresa oferta máquinas expendedoras y enfriadoras de agua.

Los fabricantes de equipo embotellador están introduciendo nueva tecnología, la cual no solo es más eficiente, sino más fácil de trabajar con ella. El uso cada vez mayor de características electrónicas y de apoyo computarizado reduce la necesidad de ajustes mecánicos y ayuda a reducir el tiempo de mantenimiento.

La creciente aceptación en América Latina de las bebidas no carbonadas, especialmente del agua mineral, ha impulsado la demanda de sistemas de llenado por gravedad. Existen diferentes modelos de equipos que ofrecen sistemas de llenado sin presión el cual presenta la capacidad de corrección de la altura del llenado inherente, basado en el uso de una presión diferencial de gas ligeramente inerte. Esta técnica da como resultado una exactitud en la altura de llenado superior y la protección de bebidas sensibles al oxígeno.

A nivel mundial las principales embotelladoras son COCA – COLA junto con Nestlé y Pepsi son las principales embotelladoras de líquido que controlan el mercado a escala mundial.

Junto con las principales embotelladoras de otros países está INCA KOLA en Perú; Postobón, Hipinto, Bavaria en Colombia; embotelladora Andina en Chile; Zaragoza en España entre otras destacada a nivel mundial.

Tabla 2: Plantas embotelladoras en el mundo

Ítem	Empresa	País	Ciudad	Tecnología
1	Global Water Technologies Group	México	Iztapalapa	SCADA - Control robusto
2	Grupo Modelo	México	Coahuila	SCADA - Control robusto
3	Coca-Cola Hellenic Bottling Company S.A. (CCH)	Rumania	Ploiesti	SCADA - Control Adaptativo
4	AGUASISTEC S.A.C.	Perú	Lima	SCADA – Múltiples Sistemas
5	Agua Purificada Bonatura®	Guadalajara	México	Control Optimo
6	H2O Soluciones Integrales	Ecatepec	México	SCADA – Múltiples Sistemas
7	Reliable Machinery	Jiangsu	China	SCADA - Control Adaptativo

Fuente: Propia

1.3. Situación problemática

En la actualidad los sistemas de medición de líquido en plantas embotelladoras utilizan sistemas muy antiguos para controlar el nivel de líquido en los tanques, en algunos casos utilizan el método de flotador para dicho control, otros sistemas usados son muy caros y hacen que las empresas pierdan ganancias por usar estos métodos.

El sistema de medición más usado es la sonda de cinta plana para medir niveles de agua, el cual tiene la desventaja de que se corroe al estar sumergido en el agua.

Los nuevos sistemas de control deben estar acorde a los avances tecnológicos, tales como la implementación de controladores difusos, neuro difuso o controladores neuronales, estos sistemas son poco usados en el país, esto debido a que no hay ingenieros que trabajen en esta rama del control.

Es por eso que se plantea crear un tipo de control que esté acorde con la tendencia tecnológica, que sea más económico y use un sensor no invasivo, para el control de nivel de líquido.

1.4. Aporte

1.4.1. Ingenieril

Es un aporte ingenieril debido a que se lleva a la ingeniería de control a otro nivel que es el control artificial, además se utilizan los conocimientos adquiridos durante la carrera y se implementa un controlador difuso, además de ser este un sistema que va acorde con las nuevas tecnologías que aparecen alrededor del mundo, esta tecnología es muy usada en electrodomésticos, además de ser investigada en distintas empresas como “Siemens”.

1.4.2. Tecnológica

El controlador difuso está acorde con las nuevas tecnologías que se usan alrededor del mundo, además de ser eficiente y de mejor respuesta que los controladores convencionales (controlador PID).

1.4.3. Económico

El controlador difuso puede reemplazar al operario de planta, además de usar sensores más económicos como los sensores de ultrasonido. Esto lleva

a una disminución de costos en el proceso productivo y a su vez un mayor ingreso económico a la fábrica.

1.4.4. Social

El controlador difuso puede ser colocado en tanques reservorios que necesiten medir el nivel de líquido, estos tanques están ubicados en zonas donde el agua es de difícil acceso y se necesita un control sobre el suministro de agua.

1.5. Bases teóricas

1.5.1. Modelamiento de control difuso

Lógica difusa (Fuzzy logic)

Para Zadeh (1965):

El concepto de lógica difusa es muy común, está asociado con la manera en que las personas perciben el medio, por ejemplo ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto, la temperatura dominante en una habitación, cotidianamente se formulan de manera ambigua y depende de quién percibe el efecto físico o químico. (p.60)

Una persona puede ser alta o baja, algo puede moverse rápido o lento, una temperatura puede ser baja o moderada o alta, se dice que estas afirmaciones acerca de una variable son ambiguas porque rápido, bajo, alto son afirmaciones del observador, y estas pueden variar de un observador a otro. Se puede preguntar cuándo algo es frío o caliente, que tan baja es la temperatura cuando decimos frío, o que tan alta es cuando decimos caliente.

Los conjuntos difusos definen justamente estas ambigüedades, y son una extensión de la teoría clásica de conjuntos, donde un elemento pertenece o no a un conjunto, tal elemento tiene solo dos posibilidades, pertenecer o no, un elemento es bi-valuado y no se definen ambigüedades.

Con conjuntos difusos se intenta modelar la ambigüedad con la que se percibe una variable. Los conjuntos difusos son la base para la lógica difusa, del mismo modo que la teoría clásica de conjuntos es la base para la lógica Booleana. Con los conjuntos difusos se realizan afirmaciones lógicas del tipo si-entonces, definiéndose estas con Lógica Difusa.

Este tema es propio de inteligencia artificial, donde se intenta emular el pensamiento humano. El campo de estudio es el control industrial, se debe tener en cuenta la experiencia o base de conocimiento del operario, esto será útil para emular el comportamiento humano con una máquina, a pesar de ser está muy limitada.

El principal centro de desarrollo es Japón, donde sus investigadores la han aplicado a muy diversos sistemas, principalmente electrodomésticos, sistemas más recientes están vinculados con la industria, la medicina y la actividad espacial. Muchas publicaciones y libros se han escrito de este tema, pero aún queda mucho por explorar.

1.5.1.1. Teoría de conjuntos difusos

1.5.1.1.1. Conjuntos clásicos

Los conjuntos clásicos surgen por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Estos conjuntos pueden definirse como un conjunto bien definido de elementos o mediante una función de pertenencia “ μ ” que toma valores de 0 o 1 de un universo de discurso para todos los elementos que pueden o no pertenecer al conjunto. Un conjunto clásico se puede definir con la función de pertenencia mostrada en la ecuación 1.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \notin A \\ 1, & x \in A \end{cases} \quad (1)$$

1.5.1.1.2. Conjuntos difusos (Fuzzy set)

Para Zadeh (1965):

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar los valores del intervalo entre 0 y 1, ya la transición del valor entre cero y uno es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos (p.338).

Un conjunto difuso en universo en discurso puede definirse como en la ecuación 2.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2)$$

Dónde:

- U = Universo de discurso
- μ_A = Función de pertenencia de la variable "x"

Cuando más cerca este la pertenencia del conjunto "A" al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable "x" al conjunto "A", esto se puede ver en la figura 1.

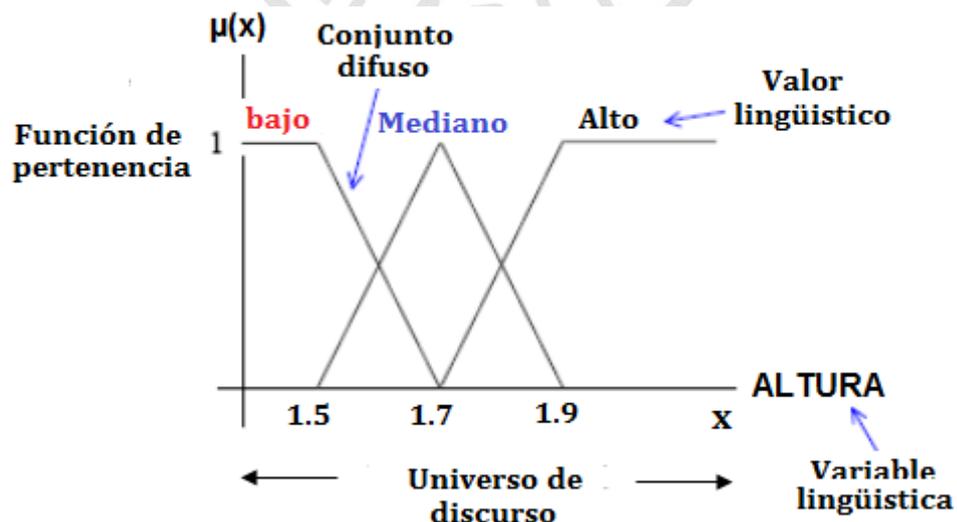


Figura 1: Ejemplo de conjunto difuso

Fuente: Zadeh, Lofti A.: "Fuzzy Sets". Information and Control. 8. 1965

El primer ejemplo utilizado para ilustrar el concepto de conjunto difuso, fue el conjunto de “hombres altos”. Según la teoría de la lógica clásica al conjunto de “hombres altos” solo pertenecen los que miden 1.80 metros, así un hombre es considerado alto cuando mide por ejemplo 1.81 metros y uno bajo cuando mide 1.79 metros. Esta razón no es lógica para catalogar a un hombre de alto o bajo ya que la altura de uno a otro solo se diferencia en 2 centímetros. En estos casos donde es difícil catalogar algo, se introduce la lógica difusa. Según la lógica difusa, el conjunto de “hombres altos” es un conjunto que no tiene una frontera clara que indique que perteneces a ese grupo o no. El evaluar si un hombre es alto o bajo, se hace mediante una función que define la transición entre alto a bajo y para ello asigna a las distintas alturas un valor entre 0 y 1. Según sea este valor se considera que se pertenece al conjunto o no. Aplicando esto en el ejemplo anterior, un hombre que mida 1.79 metros se puede decir que pertenece al conjunto de hombres altos con un grado de 0.75 y el hombre que medía 1.81 metros pertenece al conjunto de hombres altos con un grado de 0.8. Si se representa esto en una gráfica se obtendrá que la transición entre alto o bajo con la lógica difusa es una curva con cambios no abruptos mientras que con la lógica clásica, el paso de alto a bajo o viceversa es brusco tal y como se observa en la figura 2.

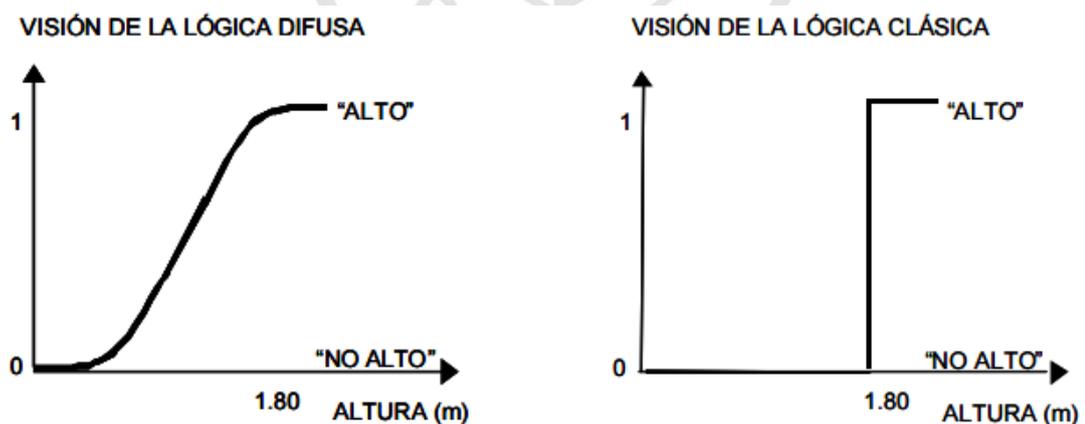


Figura 2: Lógica clásica versus lógica difusa.
Fuente: Zadeh, Lofti A.: "Fuzzy Sets". Information and Control. 8. 1965.

1.5.1.2. Función de pertenencia (Membership function)

Según Zadeh (1965) considera que la función de pertenencia proporciona una medida de grado de simplicidad de un elemento de "U" con el conjunto difuso.

La gráfica o forma de la función característica a usar depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y variará en función de la cultura, geografía, época o punto de vista del usuario. La única condición que debe de cumplir una función de membresía es que tome valores entre "0 y 1", con continuidad. Las funciones comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoidea, gamma, pi, campana, en la figura 3 se observa algunas funciones de membresía.

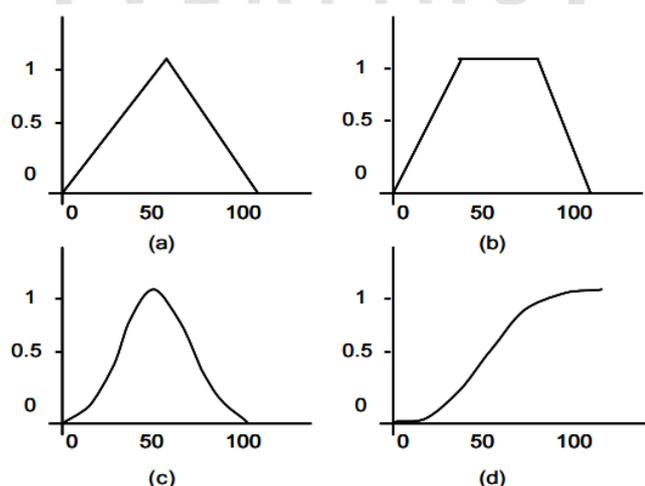


Figura 3: Algunas de las funciones de membresía más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) sigmoidea.

Fuente: Zadeh, Lofti A.: "Fuzzy Sets". Information and Control. 8. 1965.

Existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento del experto humano, y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar la función.

Aun cuando cualquier función puede ser válida para definir un conjunto difuso, existen ciertas funciones que son las más usadas por su simplicidad

matemática, entre estas se encuentran las funciones del tipo triangular, mostradas en la figura 4 y trapezoidal mostrado en la figura 5, gaussiana, entre otras.

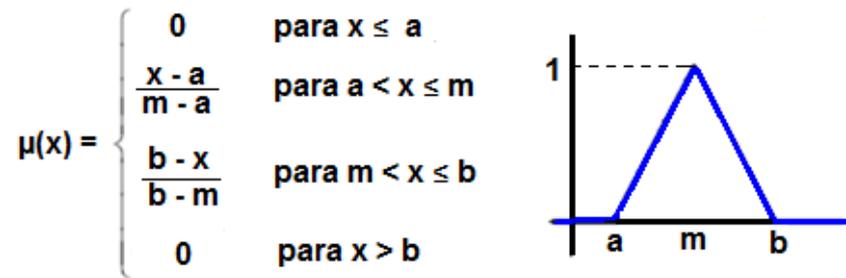


Figura 4: Función de transferencia para un conjunto difuso triangular
Fuente: Propia

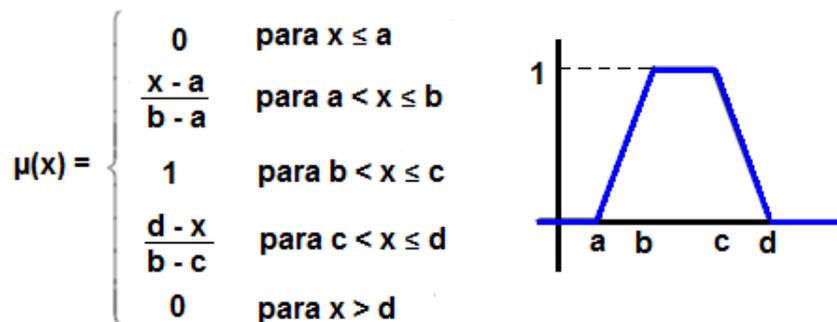


Figura 5: Función de transferencia para un conjunto difuso trapezoidal
Fuente: Propia

1.5.1.3. Variables lingüísticas

Las variables lingüísticas son etiquetas que se le da a cada función, estas son variables de naturaleza difusa. Adicionalmente las variables lingüísticas representan conceptos lingüísticos, tales como muy pequeño, pequeño, mediano y así son interpretados en un contexto particular.

Se usan variables lingüísticas para analizar y modelar un sistema, supongamos que $X = \text{"edad"}$, entonces se pueden definir set difusos: "joven", "adulto", "anciano".

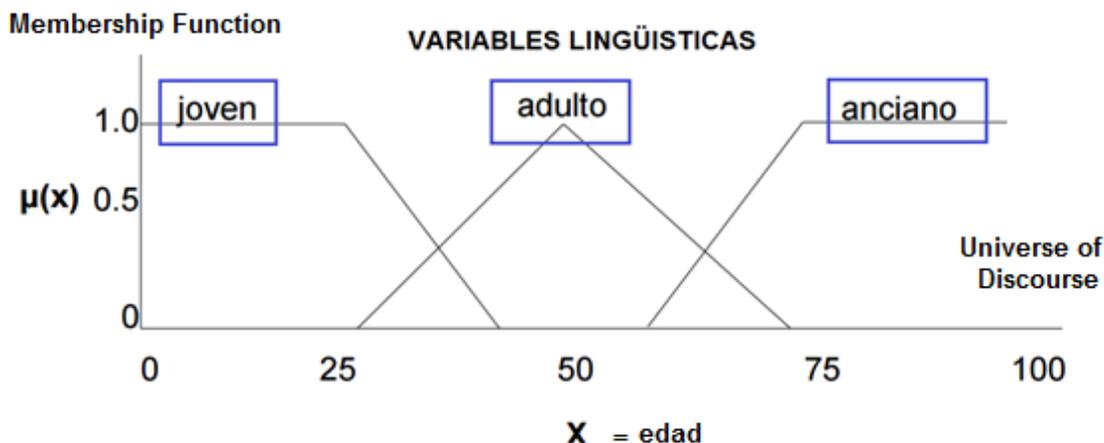


Figura 6: Ejemplo de variables lingüísticas.
Fuente: Zadeh, Lofti A.: "Fuzzy Sets". Information and Control. 8. 1965.

En la figura 6 se observa un ejemplo donde el conjunto edad (con variable x), está dividido en 3 subconjuntos: joven, adulto y anciano con sus respectivas funciones de membresía y cada función de membresía tiene su propia variable lingüística.

Entonces las variables lingüísticas aparecen cuando se utiliza el lenguaje humano creando incertidumbre, vaguedad, entre otras. Estas incertidumbres sean o no profesional pueden describir la observación o medida del resultado de un experimento o un dato. Esto es especialmente cierto cuando se trabaja con opiniones de expertos que se traducen en expresiones verbales que, posteriormente, han de ser tratadas como modalidades de una variable (variables lingüísticas).

1.5.1.4. Número difuso

Un número difuso es una extensión de un número regular en el sentido que no se refiere a un único valor sino a un conjunto de posibles valores, que varían con un peso entre 0 y 1, llamado función miembro. Un número difuso es así un caso especial de conjunto difuso convexo. Así como la lógica difusa es una extensión de la lógica booleana (que solo utiliza valores 0 y 1, exclusivamente), los números difusos son una extensión de los números reales. Los cálculos con números difusos permiten la incorporación de

incertidumbre en parámetros, propiedades, geometría, condiciones iniciales, etc.

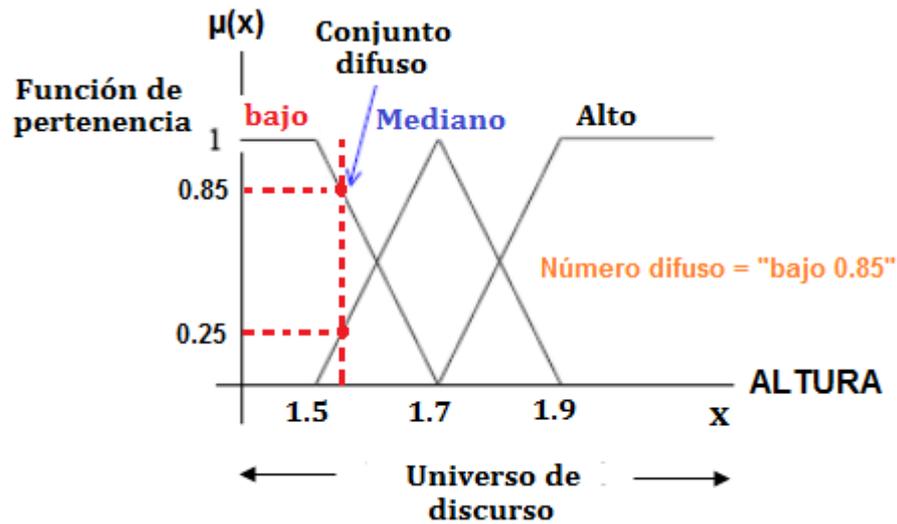


Figura 7: Ejemplo de número difuso
Fuente: Propia

En la figura 7 se observa que una persona que mide 1.55 m. tiene probabilidad de ser considerada baja o de estatura mediana como se observa a continuación:

$$\mu_{\text{Baja}}(1.55) = 0.85$$

$$\mu_{\text{Mediano}}(1.55) = 0.25$$

Se observa la probabilidad de que la persona sea considerada baja es mucho mayor a la probabilidad de que sea considerada de estatura mediana, por lo tanto se escoge al de mayor probabilidad (método de Sugeno) y se obtiene el siguiente número fuzzy.

Número fuzzy = "Baja 0.85"

Se observa que el número fuzzy va acompañado de su respectiva variable lingüística, entonces un número fuzzy es introducido al concepto de conjunto o subconjunto difuso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística.

1.5.1.5. Operadores difusos

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas que más adelante veremos. Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, estas operaciones son; complemento, unión e intersección.

Sean las etiquetas "A" y "B" las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística "x", las operaciones se definen como:

Complemento:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3)$$

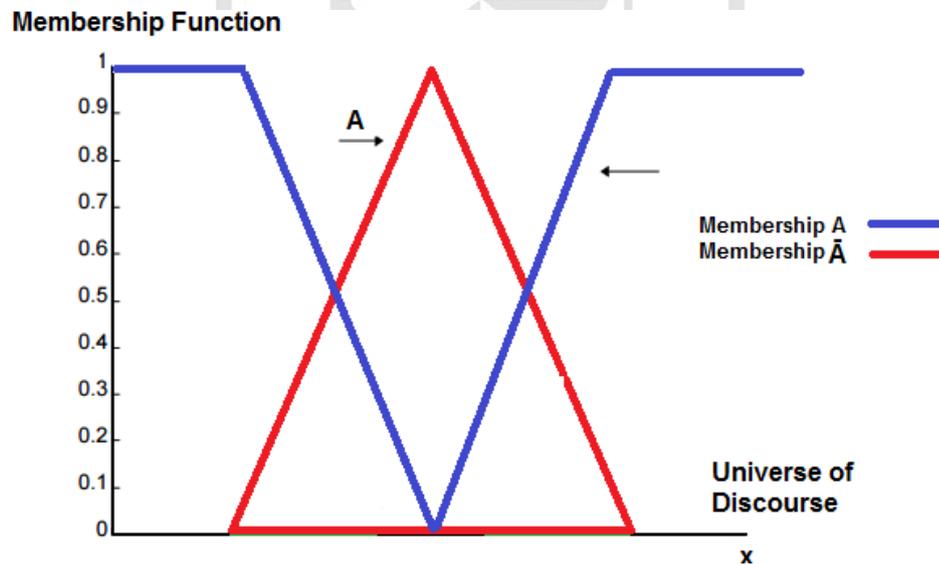


Figura 8: Complemento de A
Fuente: Propia

Unión

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4)$$

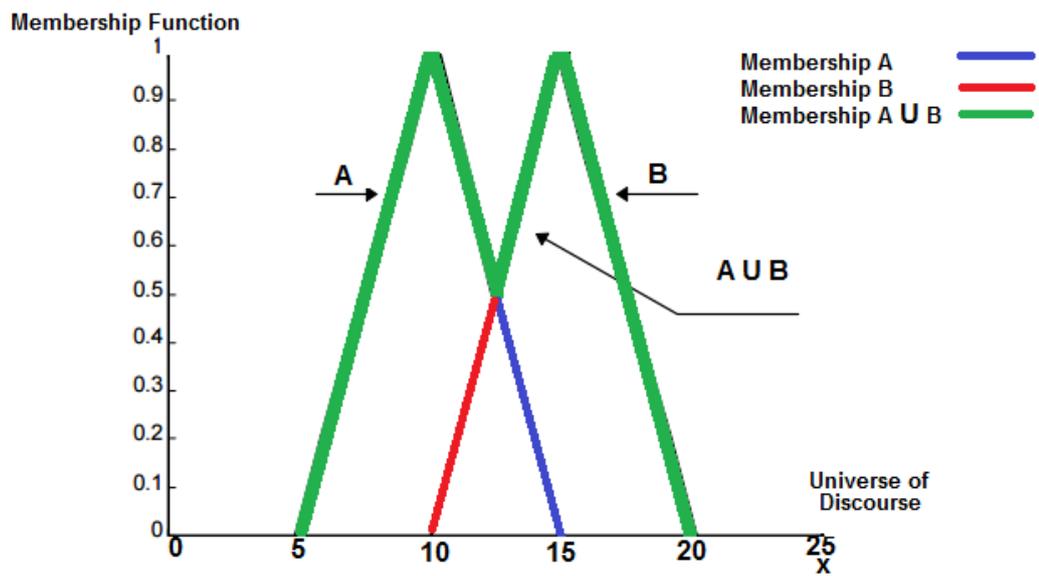


Figura 9: Unión de A y B
Fuente: Propia

Intersección

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5)$$

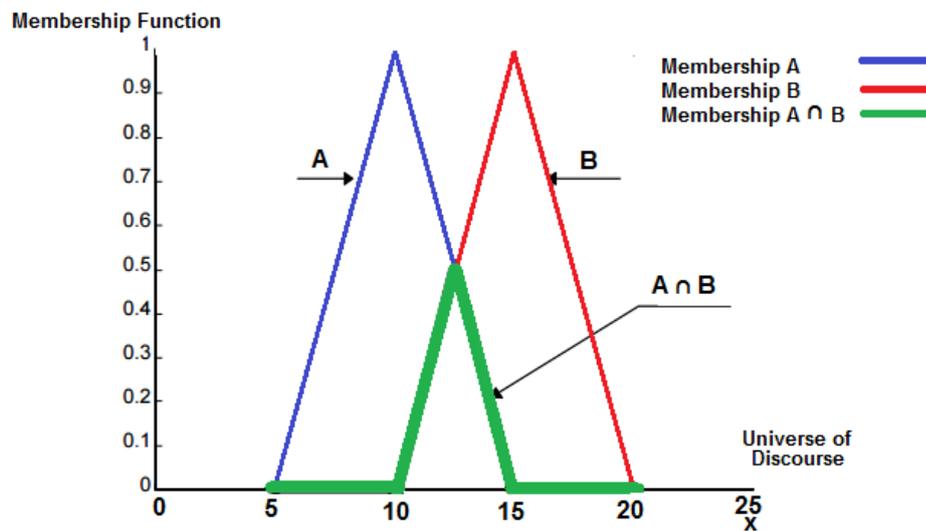


Figura 10: Intersección de A y B
Fuente: Propia

Estas tres operaciones definidas para conjuntos difusos cumplen, al igual que en la teoría clásica de conjuntos, asociatividad, conmutatividad y distribuidad.

1.5.1.6. Controlador difuso

La lógica difusa es aplicada en sistemas de control difuso que usan expresiones ambiguas para formular reglas que controlen el sistema. Un sistema de control difuso trabaja de manera muy diferente a los sistemas de control convencionales, la lógica difusa utiliza el conocimiento experto para generar una base de conocimientos que dará al sistema la capacidad de tomar decisiones sobre acciones en su funcionamiento. Los sistemas de control difuso permiten describir un conjunto de reglas que utilizaría una persona para controlar un proceso y a partir de estas reglas general acciones de control.

Control es un concepto muy común y es ampliamente usado por muchas personas en la vida cotidiana. El término es usado habitualmente para hacer referencia a la interacción entre el hombre y lo que lo rodea, más específicamente a la interacción hombre-máquina, un ejemplo sencillo es el de conducir un automóvil donde es necesario controlar el vehículo para lograr llegar al destino deseado, sistemas como este son llamados de control manual.

El control automático involucra solamente a máquinas, un ejemplo común es el control del nivel de agua de un tanque, donde dependiendo del nivel del líquido se abrirá o cerrará la válvula correspondiente a su llenado. Ambos temas son un amplio campo de estudio con aplicación en las más diversas ramas de la ingeniería.

Algunas aplicaciones son: en robótica se controla la velocidad, posición y fuerza con la que manipuladores interactúan con el medio, en la industria química el control es aplicado al flujo de líquidos, presión de gas, nivel de líquidos en depósitos, etc., incluso el cuerpo humano cuenta con mecanismos que trabajan como control automático, por ejemplo el diámetro

de la pupila del ojo, la presión sanguínea, el ritmo respiratorio, etc., son procesos biológicos que se los puede ver como equivalentes al control automático realimentado.

Los sistemas a controlar pueden ser de la más variada naturaleza. En los últimos 50 años una gran cantidad libros y publicaciones sobre control han sido presentados, de estos, los métodos de análisis y diseño son herramientas muy importantes para el ingeniero que realiza 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, puede haber una gran cantidad de motivos por la cual se opta por el control automático.

El control manual es llevado a cabo por personas que conocen (aunque sea de manera aproximada) el proceso a controlar y saben cómo debe ser el resultado de su control y cómo lograrlo, 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 (ver figura 11).

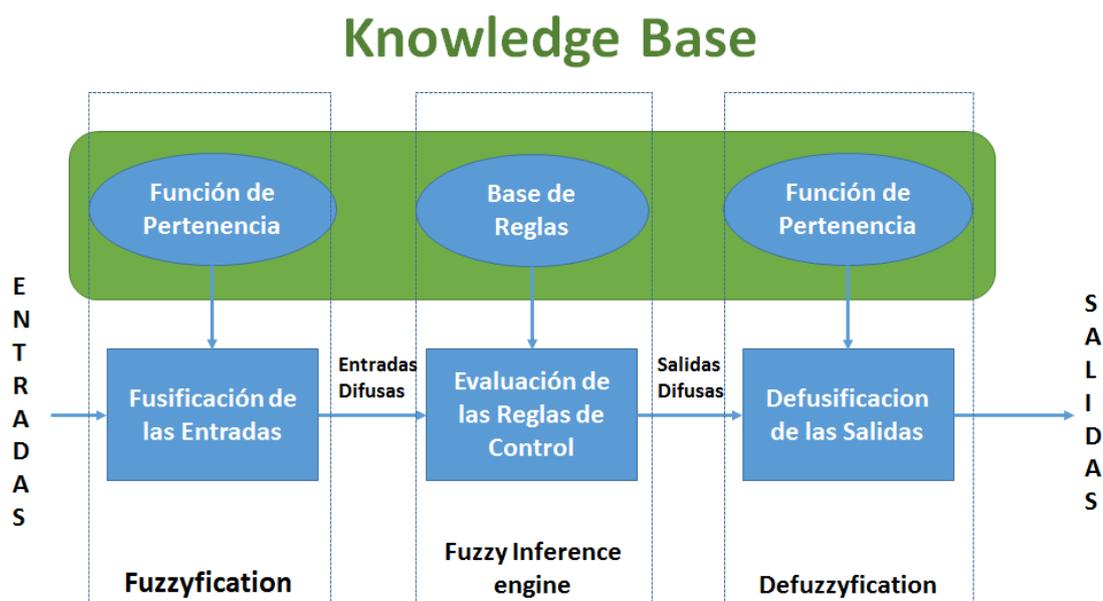


Figura 11: Estructura de un sistema difuso
Fuente: Propia

El control difuso puede aplicarse en innumerables sistemas, tanto sencillos, como brazos articulados y vehículos autónomos, en los cuales los modelos matemáticos son muy complejos; así, empleando técnicas de razonamiento aproximado es posible controlar sistemas superiores cuando el entorno no se conoce en forma precisa. Dicha característica permite mayor flexibilidad que el control clásico en el que para la realización de un controlador se requiere de un alto grado de cálculo matemático. Así, al desarrollar un controlador difuso es posible prescindir de la rigidez matemática y transmitir el raciocinio humano hacia un sistema.

Sin embargo, la aplicación más significativa se concentró en problemas de control industrial tales como: El control difuso del tren subterráneo en Sendai Japón inaugurado en 1987, los sistemas difusos en automóviles (ejemplo Nissan), entre otros; así como en equipos electrodomésticos tales como: Lavadoras difusa, hornos de cemento, estabilizadores digitales entre otros.

Existen cuatro tipos de sistemas difusos (Wang 1997) que son: a) Sistema Difuso Puro, b) Sistema Difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK), c) Sistema Difuso con Fusificación y Defusificación tipo Mamdani y d) Sistema Difuso con Fusificación y defusificación tipo Sugeno.

1.5.1.7. Fusificación

La fusificación tiene como objetivo convertir valores “*crisp*” o valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos.

El control difuso siempre involucra este proceso de fusificación, esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.

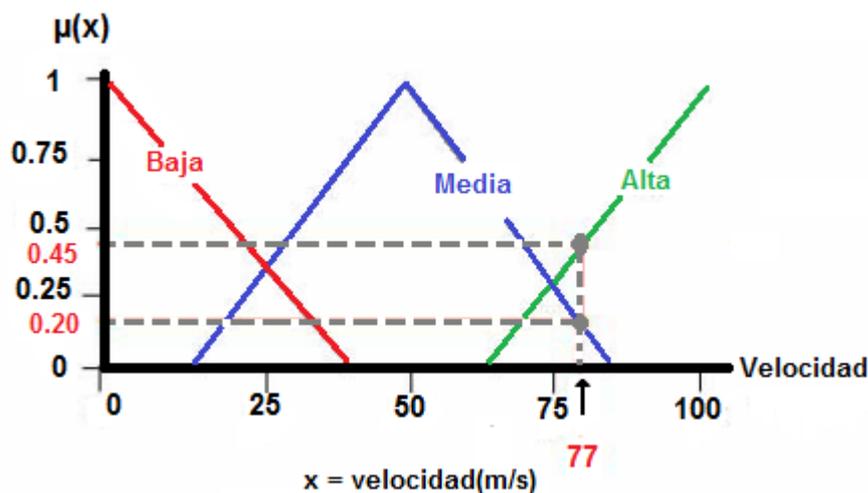


Figura 12: Ejemplo de fusificación de una variable

Fuente: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

Para comprender mejor, observemos la figura 12 que arroja los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \mu_{Alta}(77) &= 0.45 \\ \mu_{Media}(77) &= 0.20 \\ \mu_{Baja}(77) &= 0.00 \end{aligned}$$

El valor de velocidad de cierto móvil es de 77m/s², se ubica en el universo de discurso y se traza una perpendicular, se observa que esta recta corta dos conjuntos con distintos grados de verdad en cada uno.

A partir de ahora y durante el resto de las operaciones en el interior del corazón fuzzy estos datos (0.45, 0.20 y 0.00, son valores de las funciones de membresía) representarán a las variables censados del proceso. A tales datos les llamaremos “μ” en sentido genérico para diferenciarlos de otras funciones de membresía.

$$\mu_A(x) = \mu \tag{6}$$

1.5.1.8. Base de conocimiento

La base conocimiento contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se deben definir las

reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema

La base de conocimiento sirve como partida de la generación del conjunto de reglas sobre las que se rige la inferencia. Se describen los términos a utilizar y se muestra la base de conocimiento en forma de una matriz de asociación difusa.

La matriz resultante se muestra en la tabla 3 y se observa claramente que para los diferentes antecedentes siempre hay un respectivo consecuente que está basado en conocimiento empírico.

Tabla 3: Ejemplo de matriz de base de conocimiento

	INTERVALO DIFUSO		
	[9,10]	5	[0,1]
VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS		
Satisfacción del personal	Satisfecho	Algo	Insatisfecho
Aprendizaje	Mucho	Medio	Poco
Desempeño en el puesto	Elevado	Señalamiento	Bajo
Clima Organizacional	Favorable	Menos favorable	Desfavorable
Disciplina laboral	Buena	Regular	Mala
Resultados económicos	Buen	Regular	Mal
Impacto individual	Alto	Medio	Bajo
Impacto organizacional	Alto	Medio	Bajo
Impacto de la capacitación	Alto	Medio	Bajo

Fuente: <http://www.scielo.cl/scielo.php>

1.5.1.9. Reglas difusas (Fuzzy Rules)

Los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas difusas o “fuzzy rules”.

Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc.

En el siguiente ejemplo se observa un claro ejemplo de reglas difusas:

$$\underbrace{IF X_1 \text{ is "A" } AND X_2 \text{ is "B" } OR X_3 \text{ "C"}}_{\text{Antecedente}} \underbrace{THEN U_1 \text{ is "D"}}_{\text{Consecuente}}$$

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada; "A", "B" y "C" son funciones de membresía de entrada por ejemplo: alto, medio, bajo, "U₁" es la acción de control (por ejemplo, apertura de válvula) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), "D" es la función de membresía de la salida, AND y OR son operadores lógicos difusos, podrían ser otros. La primera parte de la sentencia "IF x_1 is A AND x_2 is B OR x_3 is C" es el antecedente y la restante es el consecuente.

Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

A cada regla se le puede asociar un valor entre cero y uno, esto puede ser importante cuando una regla tiene menor probabilidad que otras de la base de reglas.

Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son los que en general se emplean, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno (TS, para abreviar). La estructura de las reglas es la

misma tanto para controladores como para modelos, simplemente cambiarán las variables implementadas.

1.5.1.10. Máquina de inferencia difusa (Fuzzy inference engine)

Las reglas difusas son representaciones del conocimiento y la estrategia de control, pero cuando a la información específica se le asignan variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas se obtendrá la salida del sistema.

Existe una gran cantidad de métodos de inferencia difusa, pero hay cuatro que generan mejores resultados en el campo del control, estos son inferencia de Mamdani por mínimos (Mamdani minimum inference), RM, la inferencia del producto de Larsen (Larsen product inference), RL, la inferencia del producto drástico (Drastic product inference) RDP y la inferencia del producto limitado (Bounded product inference). El proceso de inferencia más usado es Mandami o también conocido como mínimo.

1.5.1.11. Defusificación (Defuzzyfication)

La defusificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero este es en términos difusos. Esta conclusión la salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y arrojan resultados distintos, el “más común y ampliamente usado” es el “Centroide”. Con el método de defusificación centroide, se transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada zeta (z^*) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

En la ecuación 6 representa el método de defusificación por centroide, este método es el más usado y robusto, para los diferentes sistemas de control, además de este método existen otros que cumplen la misma función pero no son muy robustos.

En la figura 13 se observa una salida fuzzy con diferentes funciones de membresía, y en la figura 14 se observa como a través del método centroide se obtiene una salida en valor “crisp” que es “z*”.

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu_B(z) dz}{\int \mu_B(z) dz} \quad (7)$$

Donde μ_B es la función de pertenencia del conjunto de salida z, cuya variable de salida es z.

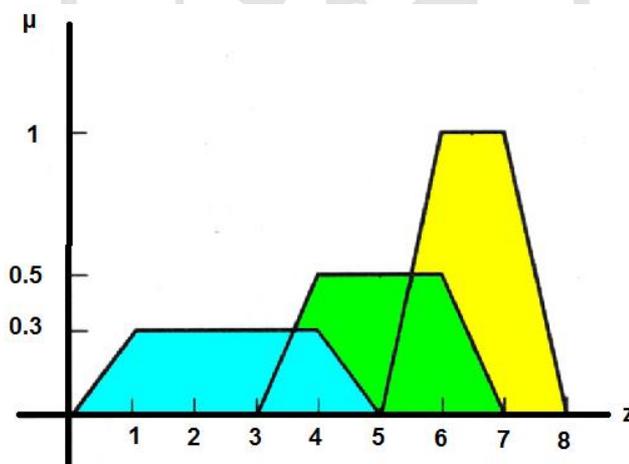


Figura 13: Área a defusificar

Fuente: Diapositivas del curso de lógica difusa. Autor: Ph.D. Fernando Jimenez Motte

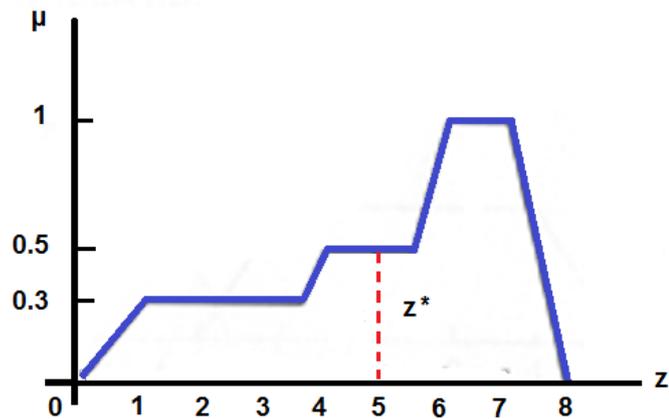


Figura 14. Defusificación a través del método centroide o método sugeno.
Fuente: Diapositivas del curso de lógica difusa. Autor: Ph.D. Fernando Jimenez Motte

Tanto la Fusificación como la defusificación son el nexo del sistema difuso con el mundo real.

A continuación se observan otros métodos de defusificación usados en control difuso.

a) Criterio de máximo (MC)

La salida es aquella para la cual la función de membresía alcanza su máximo valor.

b) El método de centro de área (COA)

Llamado centro de gravedad (COG). La salida corresponde a la ecuación 7.

c) El método de la media de máximo

La salida es el valor medio de los valores cuyas funciones de membresía alcanzan el valor máximo.

d) El método del máximo más chico

La salida es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía.

e) El método del máximo más grande

La salida es el máximo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía.

f) Bisector de área

La salida es el valor que separa el área bajo la curva en dos sub-áreas iguales

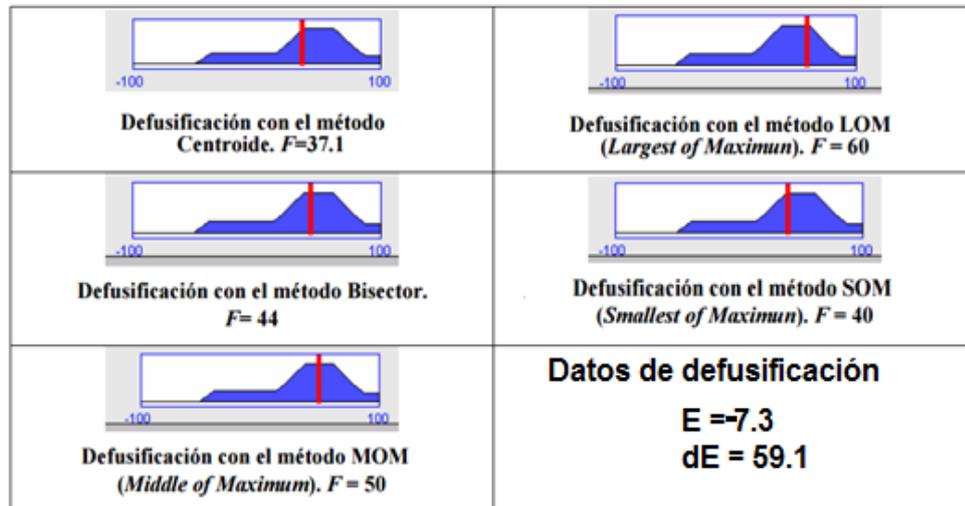


Figura 15. Ejemplos gráficos de métodos de defusificación

Fuente: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

1.5.2. Modelamiento de sensor ultrasónico

Los sensores de ultrasonidos son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8 metros. El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar. Estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas tal y como se observa en la figura 16, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco.

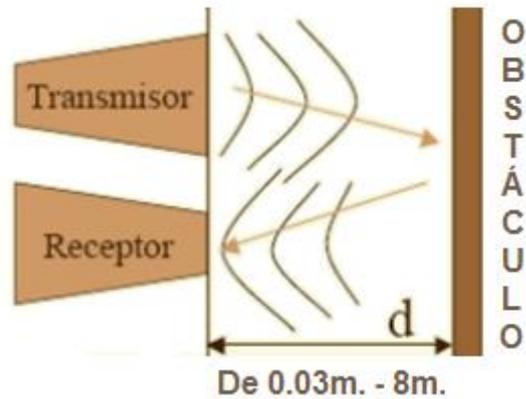


Figura 16: Efecto de ultrasonido frente a obstáculos.
Fuente: Pallas Areny Ramón, Sensores y acondicionadores de señal.

Este sensor al no necesitar el contacto físico con el objeto ofrece la posibilidad de detectar objetos frágiles, como pintura fresca, además detecta cualquier material, independientemente del color, al mismo alcance, sin ajuste ni factor de corrección. Los sensores ultrasónicos tienen una función de aprendizaje para definir el campo de detección, con un alcance mínimo y máximo de precisión de 6 mm. El problema que presentan estos dispositivos son las zonas ciegas y el problema de las falsas alarmas. La zona ciega es la zona comprendida entre el lado sensible del detector y el alcance mínimo en el que ningún objeto puede detectarse de forma fiable.

El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y este no especifica en ningún momento la localización angular del mismo tal y como se observa en la figura 17.

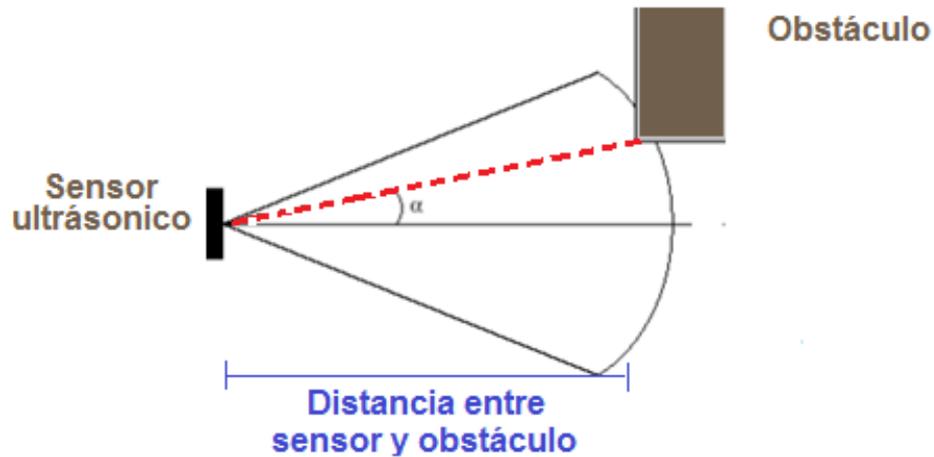


Figura 17: Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido
Fuente: Pallas Areny Ramón, Sensores y acondicionadores de señal

Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Esto implica que existe una distancia mínima (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión (ver figura 18).

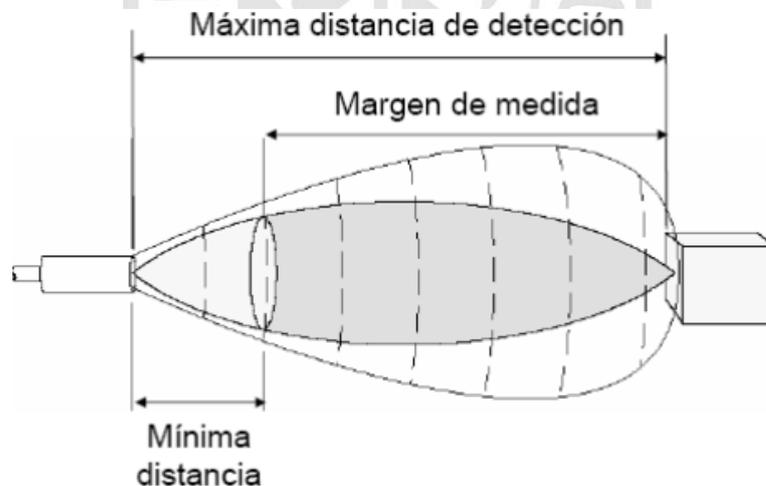


Figura 18: Margen de error dependiente de la distancia mínima
Fuente: Pallas Areny Ramón, Sensores y acondicionadores de señal

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, tal y como se muestra en la ecuación 8.

$$d = \frac{1}{2} \cdot V \cdot t \quad (8)$$

Donde:

- d = Distancia
- V = Velocidad del sonido en el aire (340m/s²)
- t = Tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso

1.6. Diagrama de bloques del sistema

A continuación se observa el diagrama general del proyecto, en el cual se observa que el micro controlador está constantemente censando el tanque de agua, después envía información al controlador difuso que está realizado en la computadora.

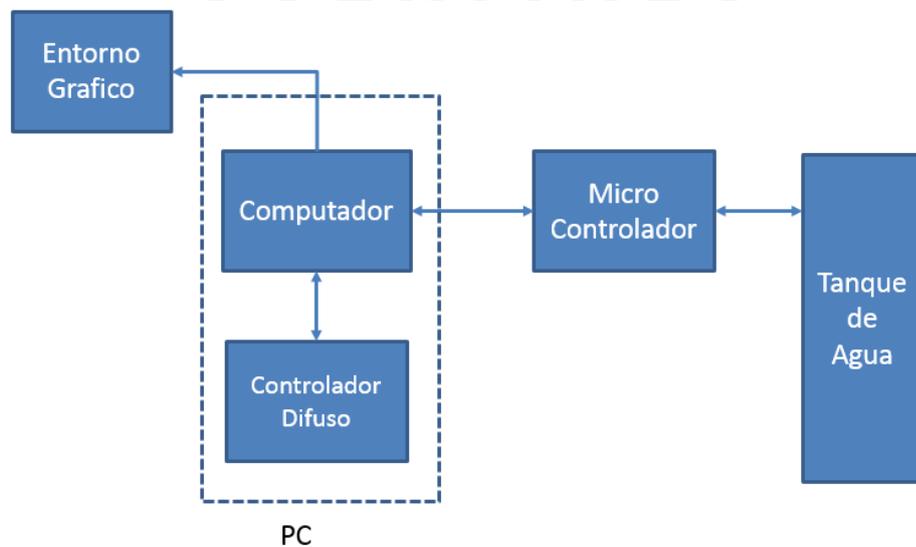


Figura 19: Diagrama de bloques general del proyecto.
Fuente: Propia

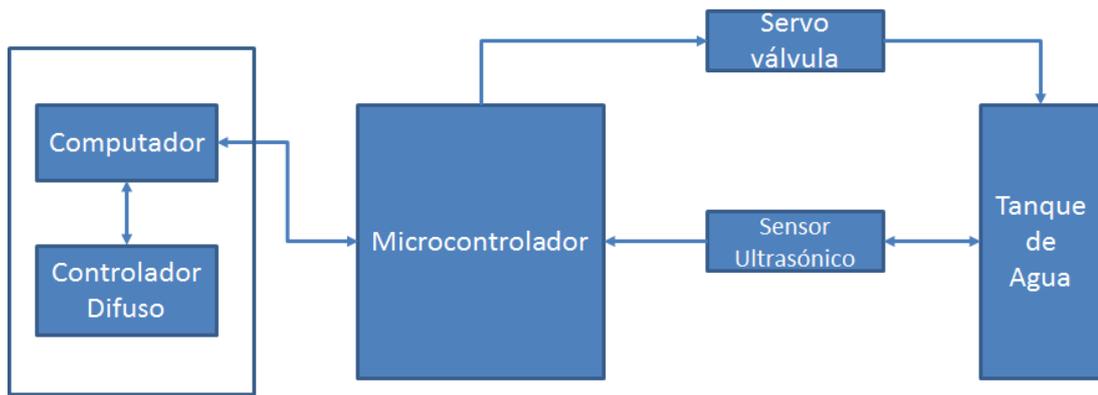


Figura 20: Diagrama de bloques del micro controlador

Fuente: Elaborado por los autores

Finalmente se observan los resultados obtenidos por el controlador difuso a través de un entorno gráfico creado en “C Sharp”.

Cabe resaltar que el controlador difuso a diseñar será programado en “C Sharp”, y la obtención de datos del sensor ultrasónico será capturada por el micro controlador “Atemga 328” y el sistema solo será realizado para fines académicos.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Para la presente tesis se requiere el diseño de un controlador para el tanque de la etapa de ozonización que cumpla con las siguientes características:

Propuesta de solución:

- Capacidad Máxima a Controlar: Ilimitada.
- Altura Máxima a Controlar: 5 Metros.
- Tipo de Sensor: Ultrasónico no invasivo.
- Líquido a Manejar: Agua.
- Temperatura máxima: 10° a 30° C (Agua Fría).
- Muestra el valor de las capacidades expresadas en litros.
- Muestra el valor de las capacidades expresadas en porcentaje.
- Error de medida máximo 1%.
- Control de cierre total al 90%
- Control de restricción a partir del 40%.
- Manejo de entorno grafico de operario.
- Muestre proceso de llenado.
- Control de 5 niveles de entrada
- Expresa niveles de entrada en vacío, bajo, medio, lleno y crítico.
- Control de 3 niveles de salida.
- Expresa niveles de salida en abierto, medio y cerrado.
- Exportación a Microsoft Excel
- Cálculos en tiempo real
- Control dinámico
- Reducción de incertidumbre
- Control Manual de entrada y salida
- Reconocimiento de falla de sensor**
- Parada de emergencia
- Pantalla LCD en Tanque
- Conexión USB

- Voltaje de Operación 5V, 12V y 24V

Los materiales usados para la presente tesis son los siguientes:

- 02 Electroválvula de 24 VDC
- 01 Sensor de ultrasonido HC-SR04
- 02 Tanque de agua de aproximadamente 17 litros
- 01 Servomotor
- 01 pantalla LCD marca Hitachi
- 01 bomba de agua de 0.5 Hp
- 01 Micro controlador Atmega 328

A continuación se detallan cada uno de los materiales:

2.1.1. Tanque de agua

El tanque de agua a usar en el proyecto es de aproximadamente de 17 litros y sus dimensiones son aproximadamente de 20cm. de diámetro por 30cm de altura y se observa en la figura 21.

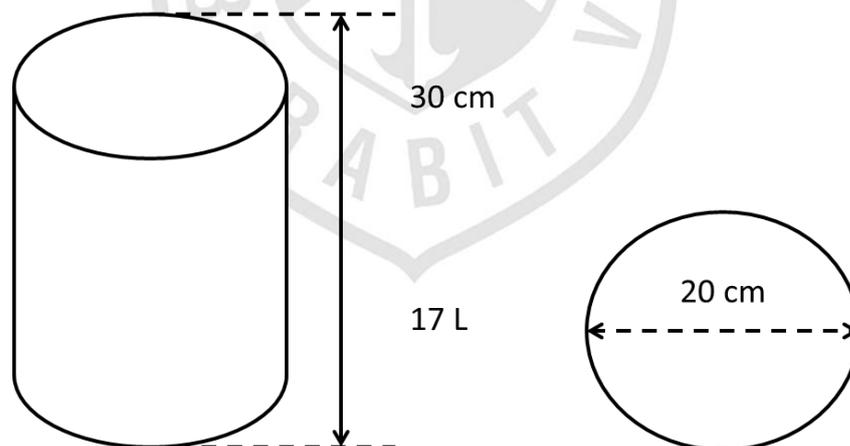


Figura 21: Prototipo de tanque de líquidos

Fuente: Elaborado por los autores

Este tanque es solo un prototipo que puede ser modificado hasta una altura máxima de 5 metros.

2.1.2. Electroválvula

Se observa que la electroválvula es exactamente lo que se busca para este tipo de proyecto, porque se necesita dejar pasar y cortar el flujo de diferentes líquidos.

Para este tipo de proyecto se usará una electroválvula solenoide que esta normalmente cerrada, esto con el fin de controlar el llenado del tanque, esta electroválvula es de la marca “SDPC” y en la Tabla 4 se muestra algunas de sus características.

Tabla 4: Características de electroválvula

Marca	SDPC
Estado	Normalmente cerrado
Voltaje	24 VDC
Corriente	500 mA
Diámetro	¾ de pulgada

Fuente: Propia

2.1.3. Servomotor

El servomotor que se usó en la presente tesis es un Servomotor *TowerPro MG995* 15Kg-cm. (ver Figura 22), este servomotor permite controlar el ángulo de apertura de una válvula. Las especificaciones del servomotor se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5: Características de Servomotor

Modelo	MG995
Modulación	Digital
Tamaño	40.7*19.7*42.9 mm.
Torque	15Kg/cm
Velocidad	52 – 62 R/m
Temperatura	-30 ~ +60 °
Ángulo de rotación	Máximo 180°
Voltaje	3 – 7.2V.
Tipo de motor	3 polos

Fuente: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg995>



Figura 22: Servomotor MG995
Fuente: www.servodatabase.com

2.1.4. Sensor ultrasónico

Para este proyecto se utilizará el sensor de ultrasonido HC-SR04, el cual pertenece a la familia Arduino y se usa por la facilidad en la captura de datos. Las características del sensor se observan en la Tabla 6.

Tabla 6: Características del sensor de ultrasonido HC-SR04

Voltaje de alimentación	5 V.
Corriente	15 mA.
Frecuencia	40 KHz
Rango máximo	5 m.
Rango mínimo	2 cm.
Ángulo de medición	15 grados
Señal de entrada	Pulso TTL (10useg)
Dimensiones del sensor	45x20x15 mm.
Resolución	0.3 cm.

Fuente: <http://panamahitek.com/sensor-ultrasonico-hc-sr04-arduino>

2.1.5. Bomba de agua

La bomba a usar en la presente tesis es un bomba 0.5 HP Bomba Periférica Pitbull.

Esta es una máquina utilizada para bombear agua limpia y líquidos no corrosivos, como agua de un pozo, de acumulación de agua en estanques, para riego de jardines y para aumentar la presión domiciliaria.

Tabla 7: Características de bomba de agua.

Marca	Pitbull
Potencia	0.5 HP
Velocidad	2850 RPM
Voltaje	220 V
Caudal	31 L/Min.
Succiona	Hasta 7 Metros
Impulsor de latón	Si
Protector térmico	Si

Fuente: Catálogo bombas de agua Pitbull, 2015

2.1.6. Pantalla LCD (Liquid Crystal Display)

La pantalla de cristal líquido que se usó en la presente tesis es de 2 filas por 16 caracteres cada una, y cada caracter dispone de una matriz de 5 por 7 puntos (píxeles), aunque los hay de otro número de filas y caracteres. A través de este dispositivo se mostrarán las distancias calculadas por el micro controlador y la distancia que hay entre el sensor y el líquido.

Algunas características del LCD son:

- Pantalla de caracteres ASCII, además de los caracteres Kanji y griegos.
- Desplazamiento de los caracteres hacia la izquierda o la derecha.
- Proporciona la dirección de la posición absoluta o relativa del carácter.
- Memoria de 40 caracteres por línea de pantalla.

- Movimiento del cursor y cambio de su aspecto.
- Permite que el usuario pueda programar 8 caracteres
- Conexión a un procesador usando un interfaz de 4 u 8 bit

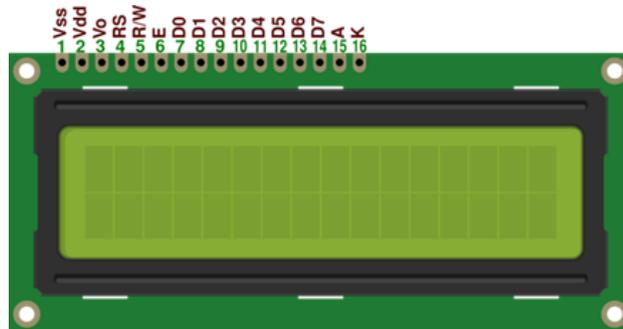


Figura 23: Pantalla LCD
Fuente: LCD module datasheet/ geniusnet.sk

2.1.7. Micro controlador Atmega 328

En la presente tesis se usa este micro controlador porque permite usar el puerto USB para simular el puerto serial, además es de bajo costo y nos permite escribir, borra y reescribir nuestro código con mucha facilidad.

Como es un micro controlador compacto de 28 pines, este se ajusta completamente con el proyecto y sus especificaciones son suficientes para el completo desarrollo de la tesis.

Tabla 8: Características del micro controlador Atmega 328

Arquitectura	8 bits
Pines I/O	23
Memoria flash	32Kb
SRAM	2Kb
EEPROM	1KB
Oscilador interno	20Mhz
Voltaje	1.8 V a 5 V.
ADC	10 bits
Timers	3
PWM	6 canales
USART	Full duplex
Transmisión	Asíncrono
Temperatura	-40 °C a +85 °C
Empaquetado	PDIP 28

Fuente: www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno

Como se observa en la Tabla 8 el micro controlador tiene conexión serial y convertidor ADC, por lo que cumple con los requisitos para esta tesis.

2.2. Métodos

En la presente tesis se usó como método principal para el control de niveles de líquidos un controlador difuso el cual fue diseñado e implementado por los autores de esta tesis, para el control difuso se necesita saber las variables de entrada y las variables de salida para luego fusificarlos y defusificarlos respectivamente.

Para la fusificación se usó el método de Mandami y la defusificación se hizo por el método de centroide o Sugeno, debido a que estos métodos son los más robustos en control difuso y se acoplan a nuestras necesidades de diseño.

2.2.1. Análisis de controlador difuso

Para poder observar el funcionamiento de esta etapa daremos un ejemplo en el que se pueda visualizar todo el proceso de fusificación y defusificación.

Para esta etapa se usará el método de “Mandami o de mínimos” que por sus características y ventajas se acoplan mejor al controlador difuso.

Entonces si se tiene en la entrada del controlador difuso un valor de 29% y trazamos una perpendicular al universo de discurso, se observa que esta línea corta a dos funciones de membresía que son: bajo y vacío, a estos cortes se les traza una perpendicular y se ve el grado de probabilidad que generan estos cortes (ver figura 24), entonces los datos obtenidos son:

$$\mu_{\text{Vacío}} \quad (29\%) = 0.13$$

$$\mu_{\text{Bajo}} \quad (29\%) = 0.89$$

De estos dos grados de verdad se elige a través del método de inferencia “Mandami” al que tiene menor probabilidad y este grado de verdad se

acompaña la variable lingüística obteniendo así nuestro número difuso que sale de nuestro fusificador.

Difuso = “Vacío 0.13”

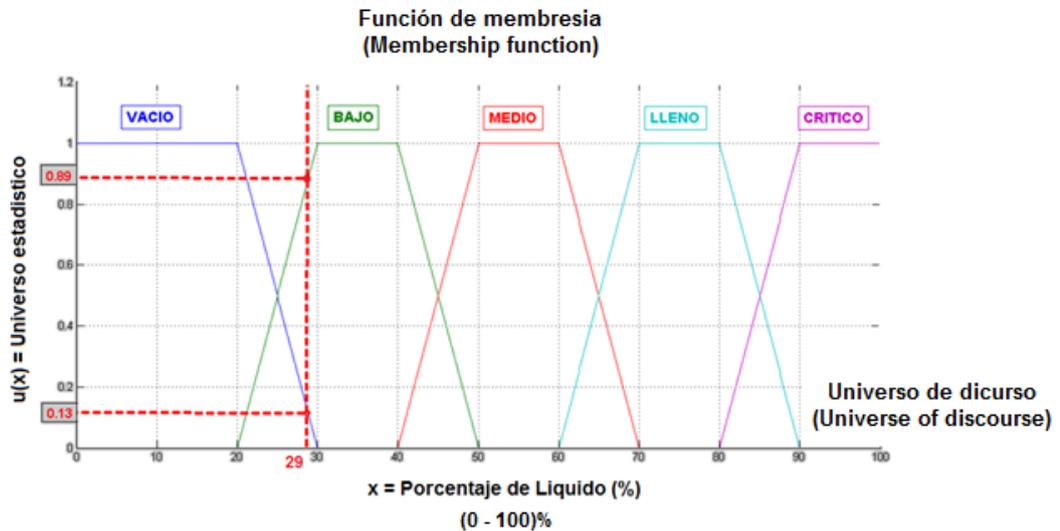


Figura 24: Ejemplo de fusificación
Fuente: Elaborado por los autores.

Este dato va a nuestra base de reglas y nos da como resultado otro número difuso que debe entrar a nuestro defusificador para obtener un número “crisp”.

SI nivel = Vacío ENTONCES Válvula = Abierto

Difuso_salida_base_de_reglas = “Vacío 0.13”

Para la etapa de defusificación se usa el método de “Centroide o Sugeno” que halla el centro del área a defusificar.

En la figura 25 se observa que el valor obtenido en el fusificador va a la función de membresía del defusificador. Según la base de reglas la salida es “Abierto” por lo que se le traza una recta perpendicular a 0.89 y este solo debe genera dos cortes sobre la función de membresía de “Abierto”.

Para hallar el valor “crisp” de salida lo que se necesita es defusificar por el método de centroide o Sugeno y esto se hace usando la ecuación 6.

Este dato obtenido del defusificador es el que va al micro controlador y este hace girar el servo válvula para abrir o cerrar la válvula.

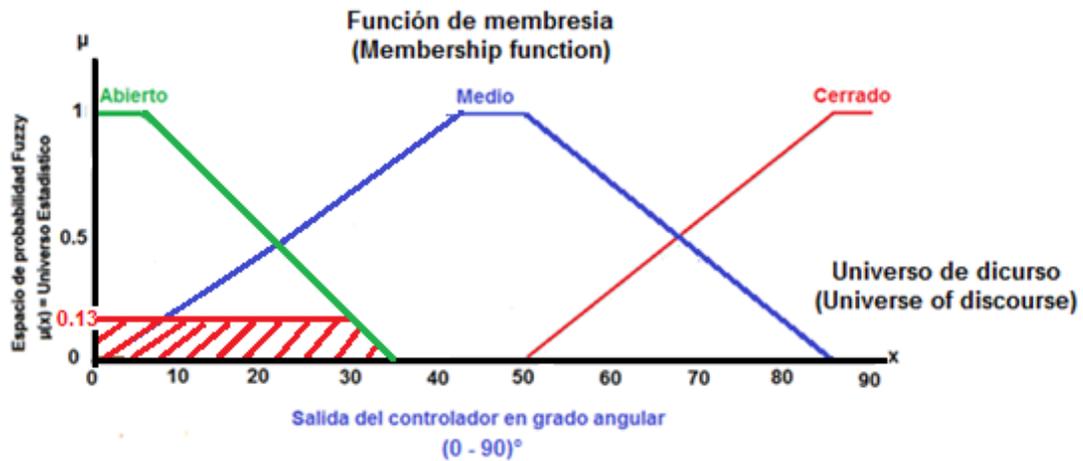


Figura 25: Etapa de defusificación
Fuente: Propia

$$\text{ÁNGULO_SALIDA} = \frac{\int_{-40,5}^{-35,82} \frac{-35,82x + 40,5}{36} \cdot x dx + \int_{-35,82}^{35,82} x dx + \int_{35,82}^{40,5} \frac{40,5 - x}{36} \cdot x dx}{\int_{-40,5}^{-35,82} \frac{-35,82x + 40,5}{36} dx + \int_{-35,82}^{35,82} 1 dx + \int_{35,82}^{40,5} \frac{40,5 - x}{36} dx} = 0$$

Después de colocar los datos en la ecuación 7 se obtiene el valor “**crisp**” que se necesita para enviar al micro controlador, en este caso el valor obtenido es de 0°, esto significa que la servo válvula se mantendrá totalmente abierta, nótese que en la ecuación anterior las integrales están limitadas por el área sombreada.

2.2.2. Análisis de distancia mediante señales ultrasónicas

Para hallar el volumen del líquido que hay en el tanque prototipo hay que hallar la distancia que hay entre la tapa del tanque y el líquido, para ello se usa un sensor ultrasónico que ayudará a hallar las distancias requeridas.

El sensor HC – SR04 cuenta con 4 pines los cuales van conectados directamente al micro controlador, en la figura 26 se observa los 4 pines del sensor con sus respectivos nombres y en la figura 27 se muestra el diagrama de tiempos del sensor.



Figura 26: Configuración de pines del sensor ultrasónico HC-SR04.
Fuente: articulo.mercadolibre.com.mx

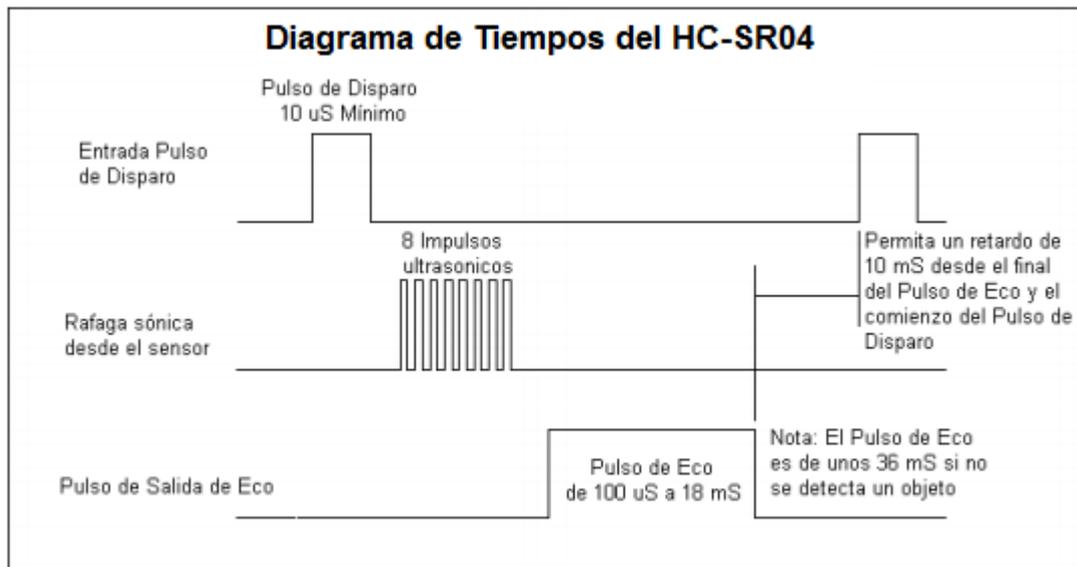


Figura 27: Diagrama de tiempos del sensor de ultrasonido
Fuente: www.arduino.cc/sensor/Ultrasonic-diagram

En la figura anterior se puede apreciar que solo se necesita un pulso de disparo TTL de 10µseg. (Sale del pin Trigger) para enviar por el sensor 8 pulsos de 40 KHz, después del envío el puerto del pin eco queda abierto y empieza a contar el tiempo que demora la señal en ir y regresar, es necesario abrir el puerto un tiempo determinado para así garantizar la correcta adquisición del tiempo de ida y vuelta de la señal.

Con la distancia obtenida por el sensor y sabiendo algunos datos del tanque tales como: el volumen total del tanque y altura máxima del tanque, entonces se puede hallar el volumen que contiene el tanque al momento del censado.

El sensor ultrasónico funciona en agua y otros tipos de líquido, siendo este tipo de sensores lo que necesitamos para esta tesis, en la ecuación se ve cómo podemos hallar la distancia con unos simples cálculos que serán hechos por nuestro micro controlador.

$$Dist = \frac{(Tiempo\ entre\ Trigger\ y\ eco) \cdot (Vel.\ del\ sonido(\frac{340m}{s}))}{2} \quad (9)$$

A continuación se da un ejemplo de cómo se halla la distancia entre dos objetos que se encuentran a 11 cm. de separación.

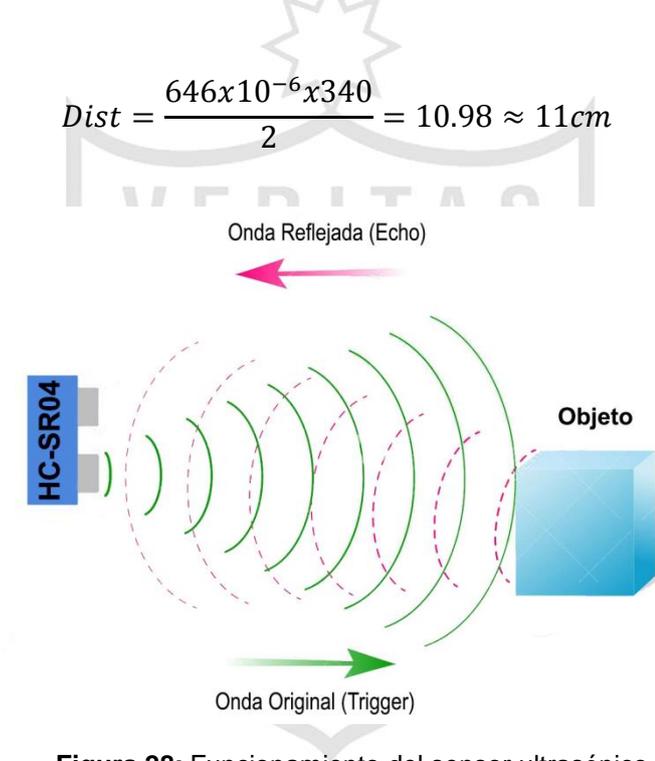


Figura 28: Funcionamiento del sensor ultrasónico.

Fuente: Serna Ruíz Antonio – Ros García Francisco. Guía práctica de sensores

En la figura 29 se observa el comportamiento interno del micro controlador para hacer el cálculo de las distancias a través del sensor ultrasónico.

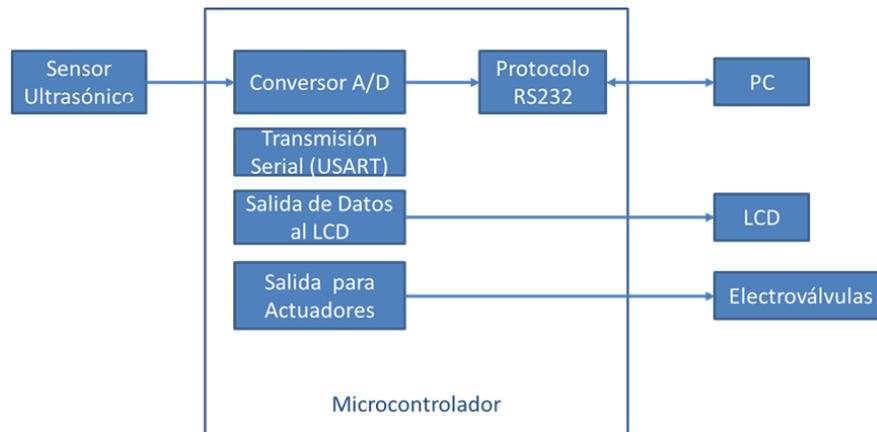


Figura 29: Diagrama de bloques del cálculo de la distancia a través de un sensor ultrasónico

Fuente: Propia

2.2.3. Análisis de la servo válvula.

Para el propósito de la tesis se ha realizado el modelamiento de una servomotor conectado con una válvula que de ahora en adelante se llamará “servo válvula”.

Con el motivo de poder controlar el ingreso del líquido al tanque, la servo válvula girará de acuerdo a la respuesta del controlador difuso y se irá abriendo o cerrando según se requiera, para ello se debe de obtener la función de transferencia de un motor de continua aplicándole una entrada escalón.

El servo motor de corriente directa, consta de una armadura y dos bobinas de campo, estas dos bobinas están conectadas en serie con su centro de derivación conectada a una fuente, según sea la corriente que pase en las dos secciones, la rotación del motor será en sentido de las manecillas del reloj o al contrario.

La razón del voltaje a la velocidad es muy lineal y así se puede calcular la velocidad sabiendo el voltaje que se mide en los bornes. La velocidad del motor se calcula con la siguiente fórmula:

$$Velocidad = 360xV(rpm) \quad (10)$$

El valor de K se calcula mediante la siguiente manera:

$$K = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Revoluciones} \times \text{Corriente}} \quad (11)$$

Donde los valores del motor son:

$$V = 15V \quad \text{Rev} = 6000\text{rpm} \quad \text{Corriente} = 1.2 \text{ A}$$

El valor de J se calcula mediante la siguiente manera:

$$J = M \frac{r^2}{2} \quad (12)$$

Dónde:

- **M** = Masa de la carga.
- **r** = radio de la carga.
- Para lo cual los valores reales, medidos y calculados, para este motor son:
- **J** = .00053
- **B** = 0.00138
- **K** = .00208
- **R** = 3.3
- **L** = 0.00929

Donde el valor de "R" y "L" fueron medidas con multímetro directamente del servo motor, el valor de "B" al ser simplemente aire y un poco de fricción de los soportes se consideró un valor bajo.

Usando estos valores en el simulador de MATLAB proporcionado anteriormente, se obtiene la figura 30.

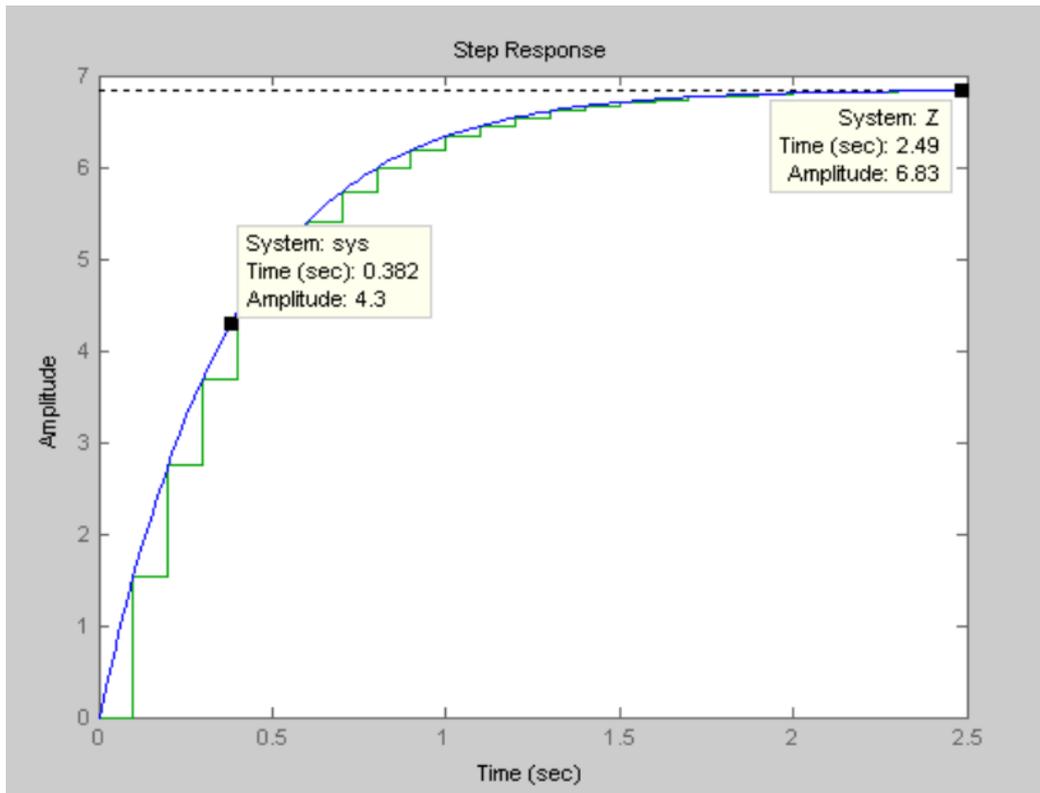


Figura 30: Respuesta del sistema en el tiempo
Fuente: Propia

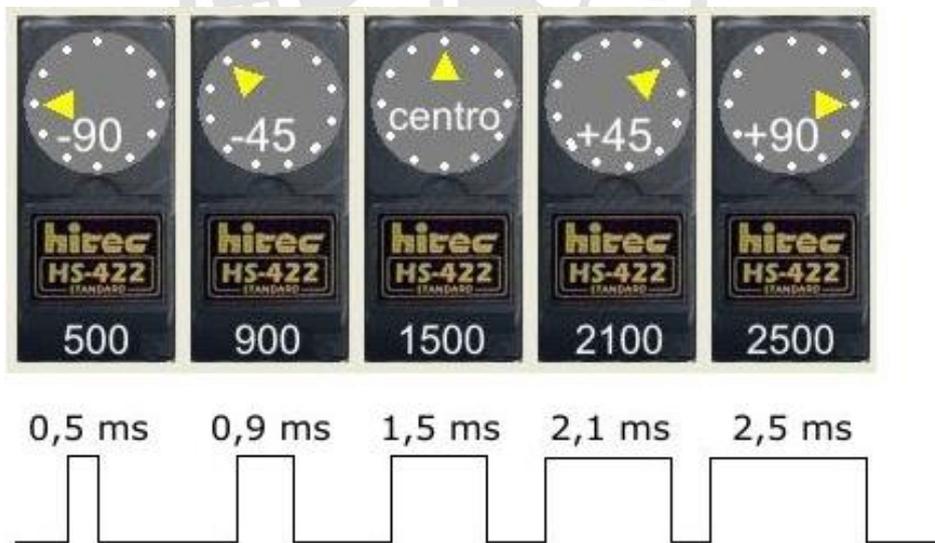


Figura 31: Grafica de Giro vs tiempo de activación
Fuente: <http://www.superrobotica.com/Servosrc.htm>

2.2.4. Análisis de electroválvula de control

En el capítulo anterior se observó las especificaciones de las electroválvulas (Tabla 4), ahora solo hace falta hallar la respuesta de sistema de la electroválvula, sabiendo que:

$$Q_e = 9.70 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$G_f = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}}{9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}} = 1$$

Asumiendo que la presión será constante debido a que la válvula está sometida a la presión atmosférica tanto en la entrada como en la salida y debido a que las pérdidas debido a la fricción serán mínimas porque la longitud entre la entrada- salida es pequeña.

$$C_v = Q_e \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} = 31,80 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \sqrt{\frac{1}{101 \text{KPa}}}$$

$$C_v = 31,80 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} (3,146 \cdot 10^{-3}) = 100,043 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Convirtiéndolo a galones por minuto:

$$C_v = 100,043 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left(\frac{15850 \text{ gal/min}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ gal/min}$$

Función de Transferencia del sistema:

$$AR \cdot \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Q_e(t)R \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación y pasando a Laplace:

$$Q_e(s)R = (164.40s + 1)h(s)$$

$$\frac{h(s)}{Q_s(s)} = \frac{R}{(164,40s + 1)} = \frac{5339.4}{164,40s + 1}$$

$$\frac{h(s)}{Q_s(s)} = \frac{5339.4}{164,40s + 1}$$

Simulación del sistema en MATLAB

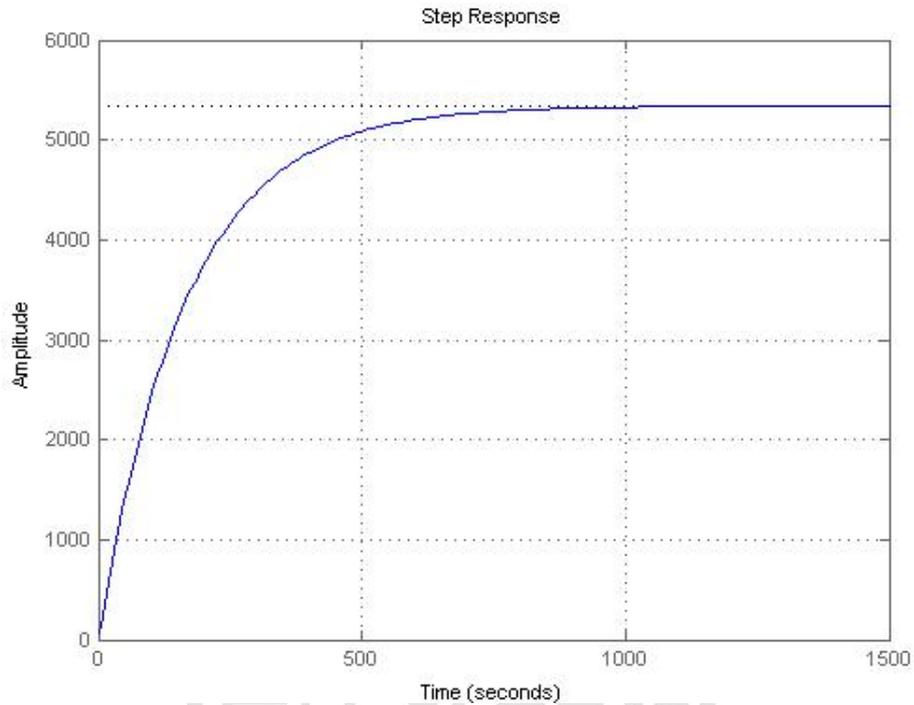


Figura 32: Respuesta del sistema de la electroválvula
Fuente: Propia

Para el correcto funcionamiento de la electroválvula se usará un circuito de acondicionamiento que está compuesto por un transistor, un relé, un transistor y una resistencia tal y como se observa en la figura 33, este circuito es ideal para trabajar con electroválvulas.

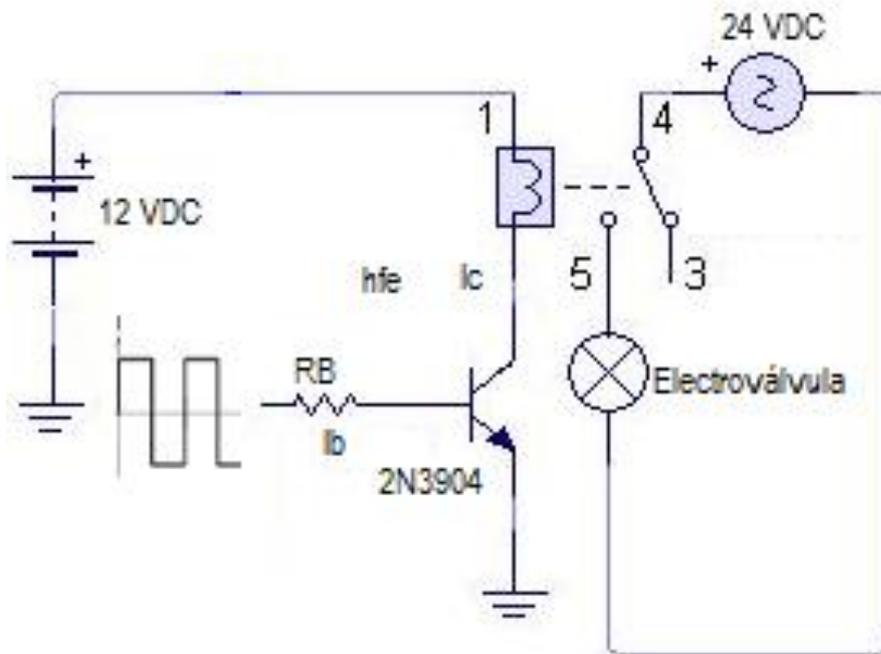


Figura 33: Circuito de acondicionamiento para electroválvula
Fuente: Propia

Dónde:

- h_{fe} = Ganancia de corriente del transistor.
- I_c = Intensidad de corriente del colector.
- I_B = Intensidad de corriente de la base
- V_{BC} = Voltaje base – colector.
- V_{IN} = Voltaje de entrada.
- R_B = Resistencia de base.

Ahora se necesita saber el valor de la resistencia R_B , por lo que es necesario hacer el siguiente análisis circuital:

$$h_{fe} = \frac{I_c}{I_b} \quad (14)$$

Teniendo como dato h_{fe} (ganancia de corriente del transistor), obtenido de la hoja de datos del fabricante del transistor 2N3904 y la corriente de funcionamiento de la electroválvula se obtiene.

$$h_{fe} = 200, I_c = 500 \text{ mA} \quad (15)$$

$$I_b = \frac{I_c}{h_{fe}} \rightarrow I_b = \frac{500 \text{ mA}}{200} \rightarrow I_b = 2.5 \text{ mA}$$

Si:

$$R_b = \frac{V_{in} - V_{bc}}{I_b} \quad (16)$$

Resolviendo:

$$R_b = \frac{5v - 0.8v}{2.5mA} \rightarrow R_b = 1680 \Omega$$

La resistencia usada será del valor comercial de **$R_b = 1500$ ohmios**.

Al término de este capítulo se observan los materiales que serán usados en esta tesis así como el análisis matemático, circuital, y lógico de cada una de las partes que intervendrán en esta tesis. También cabe resaltar que el análisis solo se hizo para los componentes principales del sistema



CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. Diseño de controlador difuso utilizando el método de defusificación centroide para la servo válvula

El controlador difuso a diseñar es un controlador de niveles de líquidos para plantas embotelladoras de garrafones de agua, en la investigación realizada en la empresa “**Backus**” se observó que las máquinas usadas en el proceso de llenado de garrafones de agua de la marca “San Mateo” son antiguas (aproximadamente con 30 años de antigüedad), las cuales nos están acorde a los nuevos cambios tecnológicos ni a las nuevas tecnologías que usan como base la inteligencia artificial. Actualmente en fábricas modernas tales como “Siemens” (donde se diseñan este tipo de sistemas inteligentes) se observa que el control de todo el proceso de llenado de botellas es inteligente, no necesitan de operarios que lo controlen, sus sistemas se interconectan entre si y usan inteligencia artificial.

Viendo esto y sabiendo que se está próximos a la cuarta revolución industrial (*Industrie 4.0 - The Fourth Industrial Revolution*) donde los procesos con inteligencia artificial van en aumento, se ha visto necesario implementar este tipo de controlador para estar acorde a la tecnología y a los avances mundiales.

En la tabla 9 se observa la actual producción de garrafones de agua en distintos tamaños de empresas, en la presente tesis nos enfocaremos en la micro empresa artesanal, debido a que este tipo de empresas necesitan reducir sus costos de fabricación y aumentar su producción.

Tabla 9: Proceso productivo de fábricas embotelladoras de garrafones de agua

Escala (rango de producción)	
Microempresa/artesanal	Hasta 10,000 garrafones mensuales
Pequeña empresa	De 10,000 a 90,000 garrafones mensuales
Mediana empresa	De 90,000 a 150,000 garrafones mensuales
Gran empresa	Más de 150,000 garrafones mensuales

Fuente: Propia

En este caso se ha seleccionado una etapa específica de todo el proceso productivo **Figura 34**, esta etapa es la de ozonización.

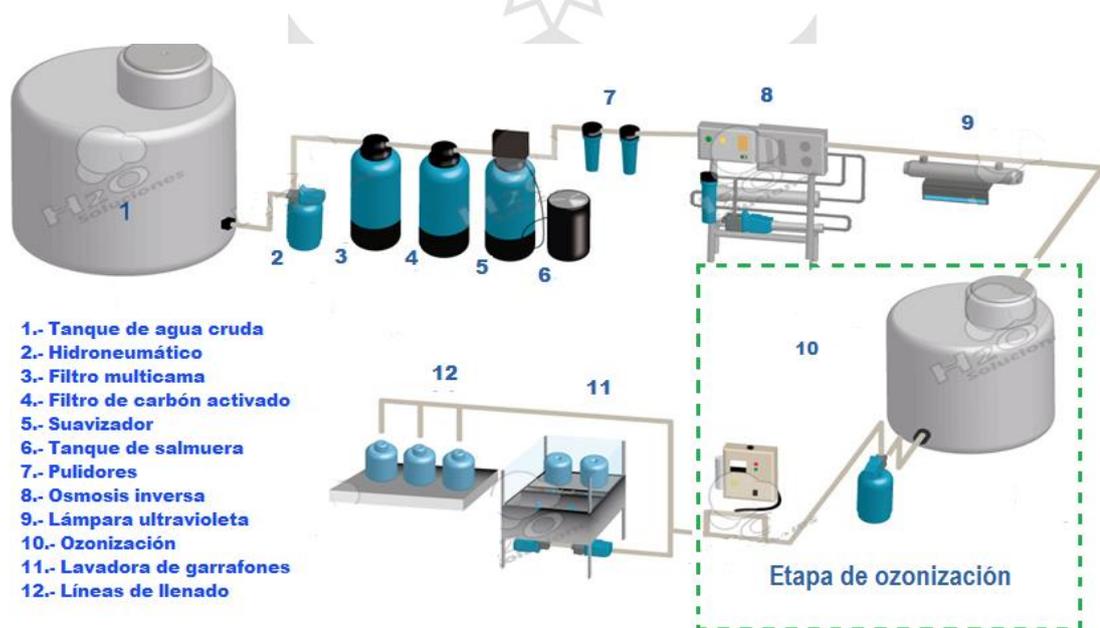


Figura 34: Etapas del proceso de embotellamiento de garrafones de agua
 Fuente: Fábrica embotelladora de agua H₂O

Después de ozonizar el líquido, este ya está apto para el consumo humano, pero antes de ozonizar el agua, esta debe estar en un tanque que siempre tenga suministro suficiente para seguir con el proceso.

En este tipo de tanques se observa que el control de líquido se hace con un sistema de boya (empresa MEGA & OZONO S.A.C.), siendo este un sistema obsoleto además de tener contacto físico con el agua, para la presente tesis se propone usar un sensor ultrasónico que cumple la misma función del

sistema de boya que es tener el suministro suficiente para el proceso de ozonizado.

El sensor ultrasónico nos ayudará en la captura de distancias que hay entre el líquido y el sensor, estas mediciones irán a un controlador difuso diseñado por los autores de la presente tesis.

Entonces el controlador difuso debe controlar que el tanque siempre tenga suministro suficiente de agua para la etapa del ozonizado, por lo que el controlador difuso simulará a un operario que cierre o abra una electroválvula, para así poder dejar pasar o restringir el líquido.

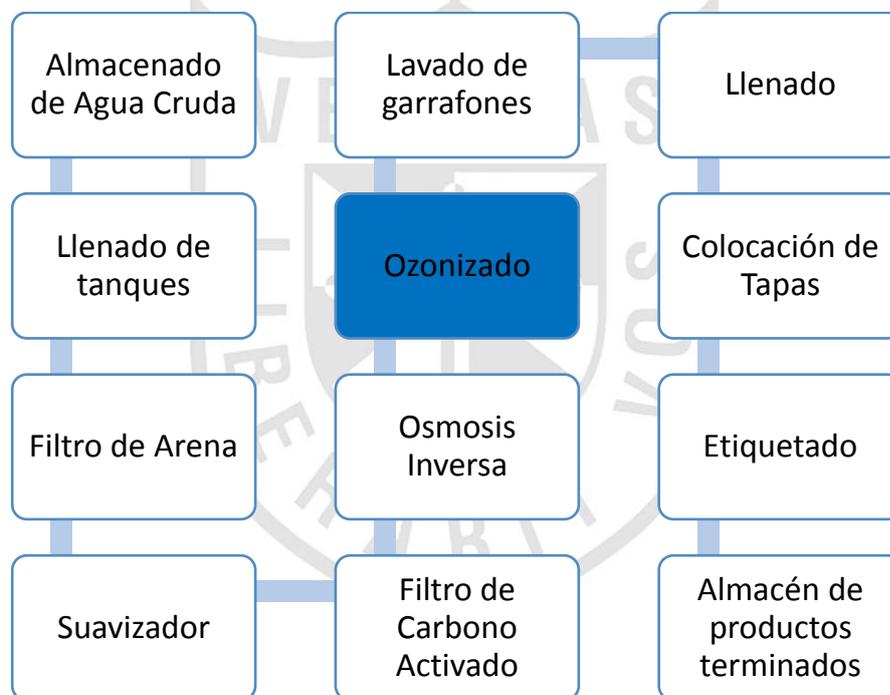


Figura 35: Diagrama de bloques de la fábrica embotelladora
Fuente: Propia

En la figura 35 se observa el diagrama de bloques de una empresa embotelladora de garrafones de agua, la presente tesis se enfoca en la etapa de ozonizado, específicamente en el tanque que esta antes de inyectar el ozono al agua para que esta sea totalmente potable y así continuar con su línea de producción.

En la figura 36 se observa el diagrama de bloques para comunicar nuestro controlador difuso con el sensor y la servo válvula.

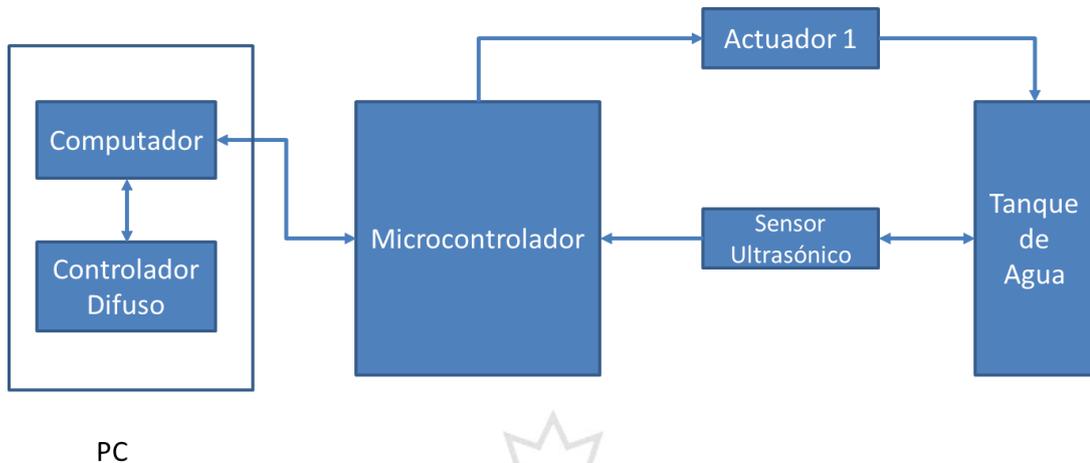


Figura 36: Diagrama de bloque de comunicación entre el controlador difuso, el sensor y la servo válvula

Fuente: Propia

Ahora bien como ya se ha visto en qué etapa va estar el controlador difuso y que plan de trabajo se va a realizar, toca diseñar el controlador difuso.

3.1.1. Entrada y salida del controlador difuso

Primero hay que saber cuáles van a ser las variables de entrada y salida, entonces se definirá que es lo que va entrar al controlador difuso y que es lo que va a salir del controlador.

Teniendo como premisa lo anterior, se desea tener un controlador que se puede acoplar a cualquier tamaño de tanque, por lo que se decidió convertir la distancia capturada por el micro controlador en porcentajes del total de nivel de líquido en el tanque, esto quiere decir que mi variable de entrada es el nivel de líquido expresado en porcentaje.

La razón de elegir que la entrada se exprese en porcentaje, es el de poder trabajar con tanques de diferentes volúmenes, ya que los volúmenes de tanques varían dependiendo de la empresa embotelladora, además si es que hubiera algún cambio de tanque, este no afectaría al controlador difuso solo cambiaríamos los parámetros de entrada y el controlador difuso seguiría trabajando con normalidad.

En el prototipo se usa un servo motor con una válvula para simular una electroválvula gradual, esto con la finalidad de poder cerrar gradualmente la válvula para tener un mejor control de llenado.

Entonces la salida tiene que ser un sistema que nos permita controlar la apertura de una válvula, que en este caso es regulada con un servomotor, entonces nuestra salida del controlador difuso será los grados de giro para que el servomotor cierre o abra la válvula.

Entonces se tiene que la entrada y salida son lo siguiente:

Entrada = Nivel de líquido en % (0-100%)

Salida = Grado Angular (0-90°)

Como se sabe cuáles van a ser la entrada y salida ahora hay que dar rangos a cada variable, para este caso la variable de entrada va de 0 – 100% y la variable de salida va de 0 – 90°.

La decisión del rango de la variable de entrada es porque el tanque siempre tiene que tener suficiente suministro de agua para poder seguir la línea de proceso, entonces se debe tener el tanque casi lleno o casi al 100%, para poder seguir el proceso de producción además de tener siempre un suministro suficiente.

El rango de la variable de salida va de 0 a 90° debido a que la válvula abre completamente en 0 grados y cierra completamente a 90 grados, se llega a 90 grados regulando poco a poco, tomando en cuenta el porcentaje de líquido que hay en el tanque, mientras mayor sea el porcentaje de líquido en el tanque menor será el grado de apertura de la válvula, y el control en el tanque será mucho mejor.

En la figura 37 se observa la entrada al controlador difuso y la salida del controlador difuso, cabe resaltar que las entradas y salidas son valores “*crisp*” o valores exactos como por ejemplo ingresan al controlador 50 % y sale 45°.



Figura 37: Entrada y salida del controlador difuso
Fuente: Propia

Si bien se observa la entrada y salida del controlador, es necesario especificar correctamente dichos valores, para tener un control óptimo del tanque.

3.1.2. Función de pertenencia y variables lingüísticas

Para las funciones de pertenencia se tiene distintos tipos de forma tales como triangulares, trapezoidales, gaussianas, etc. En este caso se usará funciones tipo trapezoidales ya que maneja un amplio rango de parámetros y de acuerdo a la investigación realizada es la que más se asemeja a un experto en dicha área de ozonización.

No se usa las funciones de pertenencia del tipo triangulares porque su grado de cambio es más rápido y esto no nos permite tener un mejor control sobre nuestras variables lingüísticas.

Ahora que se tienen definidas las funciones de membresía (membership function), se necesita darle a cada función un nombre o variable lingüística que permita saber el manejo de los niveles de líquido en el tanque, estas variables son dadas por un experto en dicho campo, que en base a su experiencia determina las distintas maneras de describir el nivel de líquido en los tanques.

Para la presente tesis, las variables lingüísticas fueron dadas por un experto que capacita en “Ace Home Center” y luego validadas con un operario de la empresa “Backus” que ven los procesos de llenado de tanques que se encuentran antes del ozonizado de agua. Se realizó una reunión con el

experto y mostro los diferentes niveles de líquidos de un tanque así como el nombre que él otorga a dichos niveles, para así controlar la válvula de apertura y cierre de líquidos.

Las variables lingüísticas escogidas para esta tesis son:

Vacío, bajo, medio, lleno y crítico.

Dichas variables son las que el experto usa frecuentemente para describir el nivel de líquido que hay en el tanque, para distintos expertos hay más o menos estados del tanque, esto depende de la experiencia de cada experto. Para este caso se optó por cinco variables lingüísticas, y cada una de estas tiene un grado distribución en nuestro universo de discurso (ver figura 38), y refleja de una manera más precisa la incertidumbre que tiene el operario cuando se está entre dos niveles.

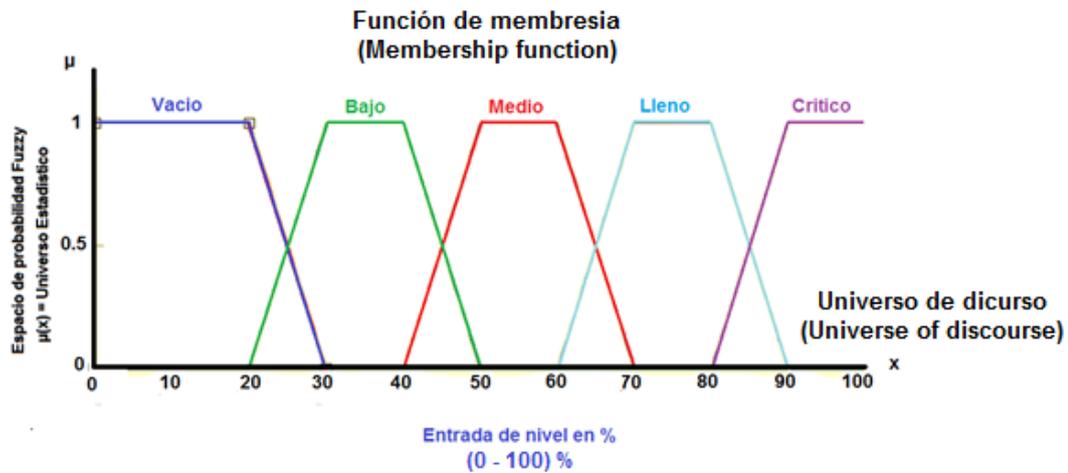


Figura 38: Funciones de membresía y variables lingüísticas de la variable de entrada.
Fuente: Propia

En la figura anterior se ve que entre cada función de membresía hay un espacio de incertidumbre y el operario elige en qué estado se encuentra el nivel de tanque a través de su experiencia.

Ahora que se tienen definidas las funciones de membresía en la entrada, toca hacer lo mismo para la variable de salida, para la salida se optó por la función de membresía de tipo trapezoidal, esto porque no se desea que la válvula abra o cierre intempestivamente, si no que cierre gradualmente.

Imitando a la acción que realiza el experto humano cuando va variando el nivel de líquido en un tanque.

Se decidió solo usar tres funciones de membresía con sus respectivas tres variables lingüísticas que son:

Abierto, medio y cerrado.

Esto debido a que el experto humano normalmente abre o cierra la válvula dependiendo de lo que observa en el nivel del tanque y este medio puede restringir o permitir el ingreso de más o menos líquido al sistema.

La variable lingüística de “Medio” tiene un mayor rango (ver figura 39), esto debido a que el operario normalmente está modulando la válvula durante casi todo el proceso de llenado, mientras que el cerrado de válvula solo se da cuando el tanque está casi lleno o va a llegar a un estado “Crítico”.

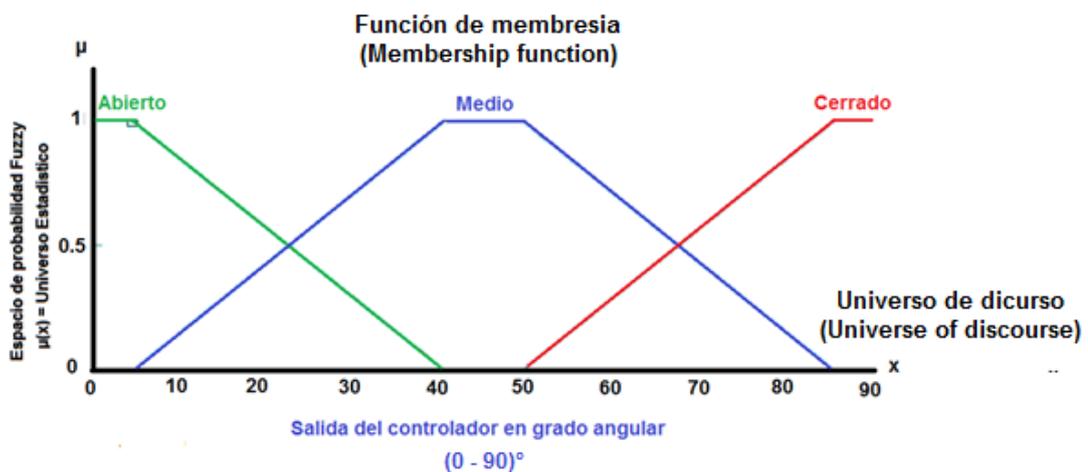


Figura 39: Funciones de membresía y variables lingüísticas de la variable de salida
Fuente: Elaborado por los autores

3.1.3. Base de reglas

Como ya se definieron las funciones de pertenencia y las variables lingüísticas, ahora toca crear la base de reglas.

Para este controlador difuso se generó 5 reglas que van acorde a la experiencia del experto. En este caso se tomó la decisión de crear las reglas difusas del tipo Mandami que son del tipo “Si – Entonces”.

Las reglas generadas son las siguientes:

- **SI nivel = vacío** ENTONCES **Válvula = Abierto**
- **SI nivel = Bajo** ENTONCES **Válvula = Abierto**
- **SI nivel = Medio** ENTONCES **Válvula = Medio**
- **SI nivel = Lleno** ENTONCES **Válvula = Medio**
- **SI nivel = Critico** ENTONCES **Válvula = Cerrado**

Estas reglas se basan en la experiencia del experto humano, entonces el controlador simulará a dicho experto y decidirá qué hacer con la válvula sin importar el grado de incertidumbre que existe en el proceso.

Ahora que se tiene la base de reglas, estas serán simuladas en matlab para poder observar cómo funciona el controlador (ver figura 40).

En el ejemplo se observa una entrada de nivel de líquido de 50% y se observa una salida del controlador difuso de 45°, esto significa que la válvula estará abierta solo 45°.

Se aprecia que las 5 reglas están representadas por los trapezoides, para una entrada de 50 % se observa que este solo corta la regla 3 (rule 3) y esto da como resultado da una salida de 45 grados de apertura de la válvula.

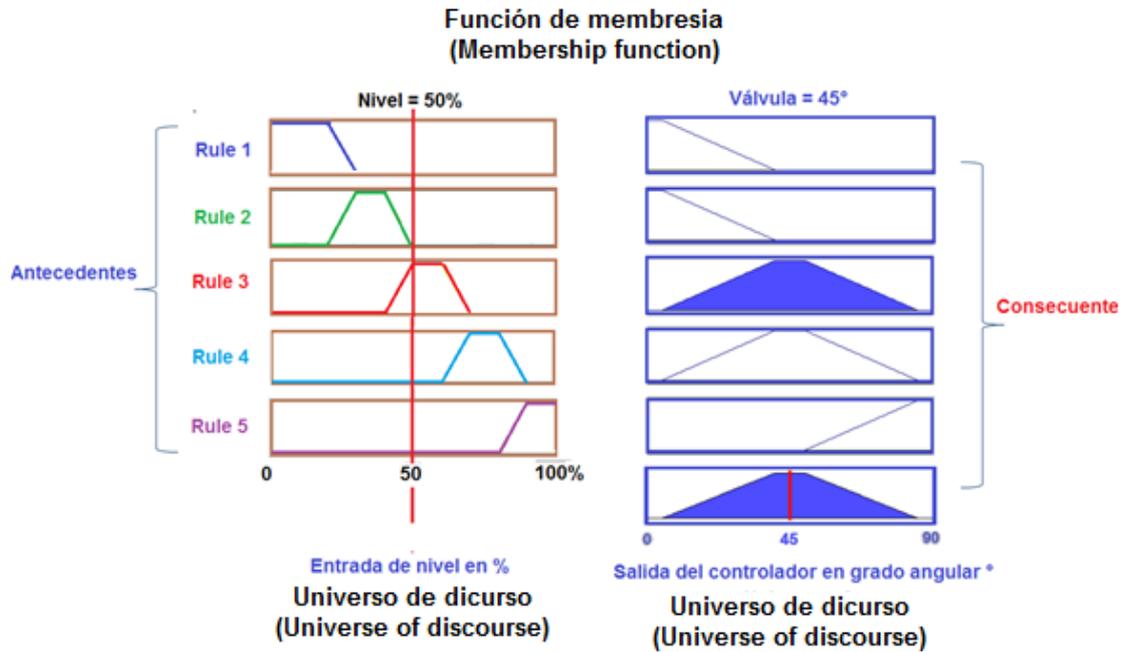


Figura 40: Base de reglas
Fuente: Propia

3.1.4. Fusificación

En la etapa de fusificación los valores “*crisp*” son ubicados en el universo de discurso y estos otorgan el grado de pertenencia a cada conjunto, en este caso una variable “*crisp*”, este puede tener hasta dos grados de pertenencia, esto depende de donde corte a las funciones de membresía.

La variable “*crisp*” que ingresa al controlador difuso es transformada a funciones de pertenencia o grado de verdad de la función de membresía, estos grados de pertenencia deben ser convertidos a un número difuso. A través del método de inferencia de tipo “Mandami o de mínimo - máximo”, se logra obtener el número difuso que sale de nuestra etapa de fusificación para luego ir a nuestra base de reglas.

El método de inferencia del tipo “Mandami” es el mejor para fusificar valores “*crisp*” y fue elegido para este prototipo por la robusticidad y facilidad de implementación.

3.1.5. Defusificación

La salida del fusificador es un número difuso, este entra a la base de reglas y sale otro número difuso, el cual debe ser convertido a un valor “*crisp*” o valor entero que pueda ser enviado al micro controlador y este a su vez ejecute la orden de abrir o cerrar gradualmente la válvula.

Entonces en la etapa de fusificación lo que se hace es convertir ese número difuso a un valor entero que pueda reconocer el micro controlador. Existen varios métodos de defusificación que están descritos en el capítulo 2, pero el que se usa para este prototipo es el de “Sugeno o Centroide”, el cual es un método muy robusto y se ajusta al presente proyecto.

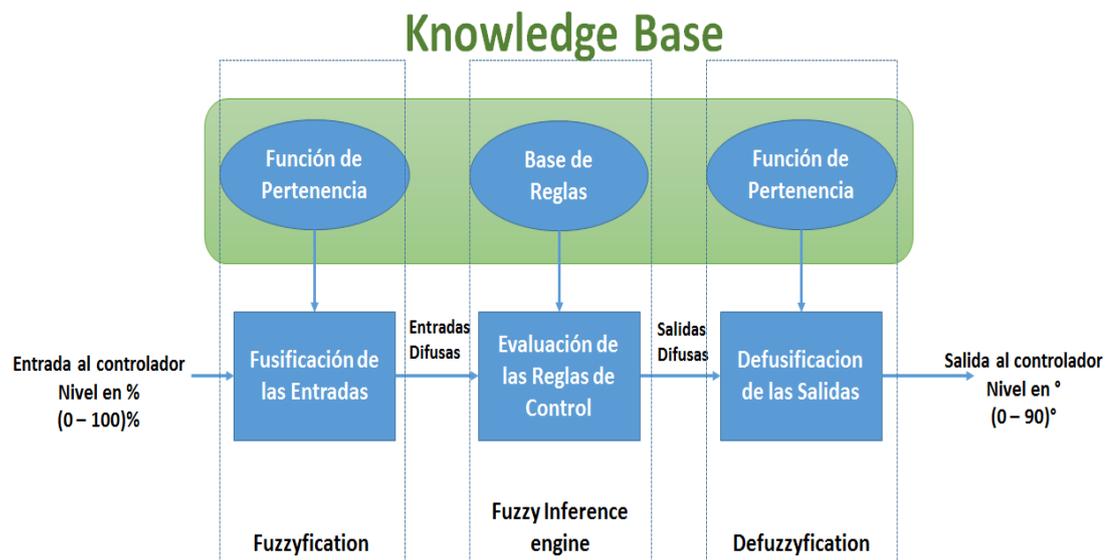


Figura 41: Diagrama de bloques de controlador difuso para la presente tesis
Fuente: Propia

3.1.6. Especificaciones de diseño del controlador

A continuación se detalla las características que tiene el controlador difuso para poder operar satisfactoriamente.

- Capacidad Máxima a Controlar: 1000 Litros
- Altura Máxima a Controlar: 1.50Metros
- Tipo de Sensor: No invasivo
- Líquido a Manejar: Agua

- Temperatura máxima: 10° a 30° C (Agua Fría)
- Deberá indicar el valor de las capacidades expresadas en litros y porcentaje
- Error de medida máximo 5%
- Control de cierre total al 90%
- Control de restricción a partir del 50%
- Detección de fallas
- Parada de emergencia
- Conexión USB

3.2. Diseño de las especificaciones para el tanque de agua en la etapa de pre ozonizado

Para poder realizar el control difuso de un tanque prototipo, se debe cubrir algunas especificaciones de diseño de tal manera que este se pueda operar y controlar cuidando siempre las medidas de seguridad en un ambiente experimental.

Para ello se requieren de algunos componentes que están descritos en la tabla 10.

Tabla 10: Componentes para el tanque prototipo

Ítem	Cantidad	Componente	Medidas	Material	Observación
1	01	Balde	17 Litros	Plástico	Temperatura de operación: 0° a 45°
2	03	Unión	½ x ½ pulgada	Plástico	Agua Fría
3	08	Niple	½ x ½ pulgada	Plástico	Agua Fría
4	04	Tubo de Abasto	½ x ½ pulgada	Plástico	Agua Fría
5	04	Jebe de retención	½ pulgada	Jebe	Agua Fría
6	01	Rosca de retención	½ pulgada	Plástico	Agua Fría
7	01	Unión de 90°	½ pulgada	Plástico	Agua Fría
8	01	Tubería de Agua	20cm x ½ pulgada	Plástico	Agua Fría

Fuente: Propia

Es importante tener en cuenta las características de cada uno de los materiales tanto es sus medidas, material y observaciones; ya que el tanque se está diseñando para poder controlar solamente agua fría, en caso se requiera controlar otro líquido que tenga una densidad diferente o la temperatura varié, se deberá de cambiar los componentes ya que estos están diseñados específicamente para operar con agua fría.

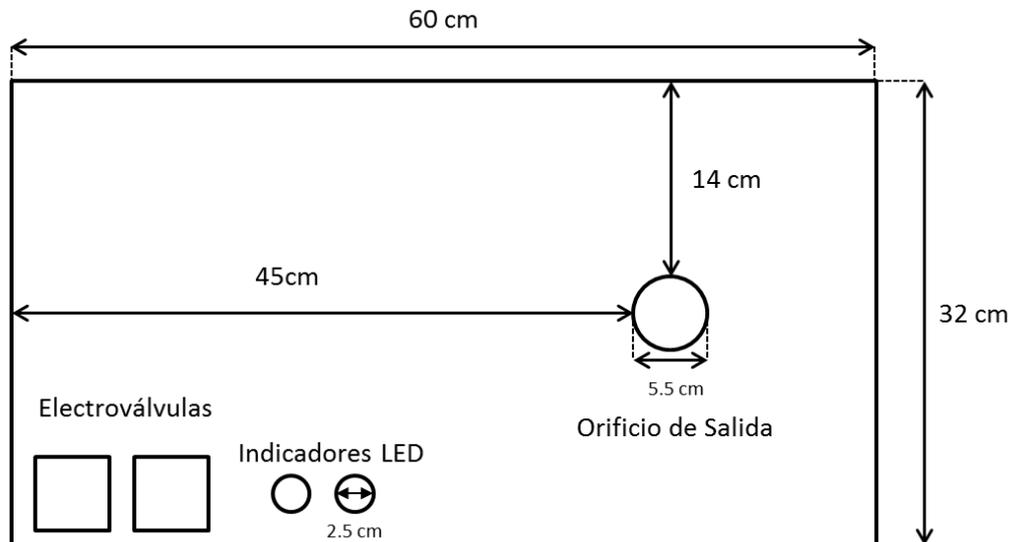


Figura 42: Base de control de tanque
Fuente: Elaborado por los autores

Especificaciones de diseño del tanque

- El tanque debe tener las siguientes características:
- Capacidad Máxima: 1000L
- Altura Máxima: 150 cm
- Diámetro Máximo: 100 cm
- Conexión de Entrada: 1 ½ pulgada
- Conexión de Salida: 1 ½ pulgada
- Tipo de Sensor: No invasivo
- Material de Fabricación: Polietileno
- Líquido a Manejar: Agua
- Temperatura máxima: 10° a 30° C (Agua Fría)

3.3. Diseño de captura de datos del sensor ultrasónico

En el siguiente diagrama de flujo se observa la captura de señal del micro controlador.

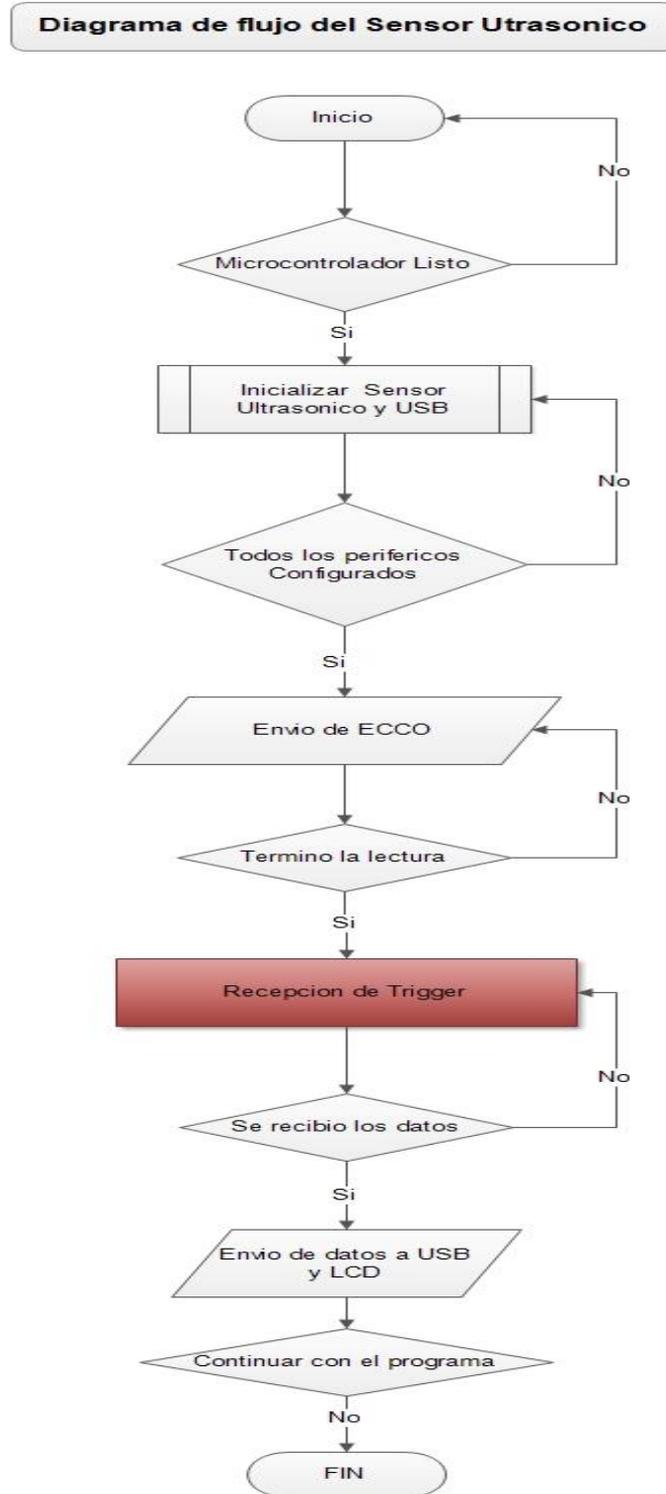


Figura 43: Diagrama de flujo de captura de datos de sensor ultrasónico.

Fuente: Elaborado por los autores.

En la figura figura 43 se observa todo lo referido a la transmisión de valores obtenidos por el sensor ultrasónico, se utiliza siempre un micro controlador que para este caso en particular es el “**ATMega 328**” que procesará las entradas y salidas del sistema.

Para ello primero se realizan las configuraciones iniciales del micro controlador, es decir se deberá de encender y realizar la conectividad asignándole un puerto COM para la comunicación serial tanto de transmisión como de recepción; además debe de cargar las librerías del LCD y Sensor ultrasónico.

Luego de ello se inicializará el sensor ultrasónico y pantalla lcd para la operación, esta verificación está programada para realizarse en 0.5 segundos para el sensor ultrasónico y un segundo para el LCD, una vez que estos ya se encuentran inicializados se genera una señal de ECCO para medir la distancia, el rebote de esta señal será capturada por el Trigger y enviada al procesador que correrá el algoritmo de medición generando como resultado final la distancia en centímetros (también puede generarse en pulgadas) que es la unidad de medida que nosotros necesitamos para la aplicación.

Este valor en centímetros tiene dos destinos el primero es el lcd para que pueda ser visualizada por el operario cuando se encuentre cerca de la planta y el otro destino es el puerto de comunicación USB que será enviado al controlador difuso para que se pueda realizar la toma de decisiones en la operación.

Al cortar la comunicación por USB se detendrá automáticamente todos los procesos del micro controlador.

3.4. Diseño de servo válvula

Para poder controlar la servo válvula modelada y analizada en los capítulos anteriores, se debe generar una estructura de soporte la cual garantice el correcto funcionamiento de la misma su acoplamiento entre la válvula y el servomotor de tal manera que la respuesta de funcionamiento sea efectiva.

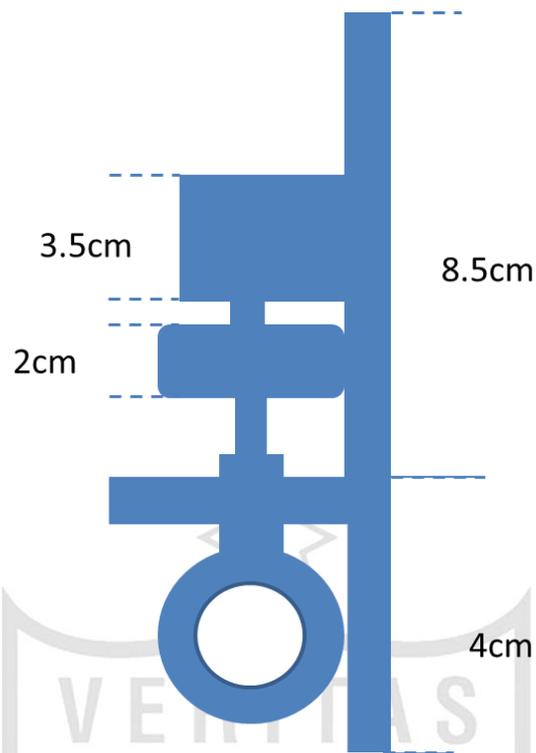


Figura 44: Diseño de la estructura de la servo válvula
Fuente: Propia

Especificaciones de diseño de servo válvula

Las características de diseño son las siguientes:

- Materia de estructura: Metal
- Servomotor: MG995 15Kg/cm
- Válvula: Válvula de paso de ½ pulgada
- Fluido a operar: Agua fría
- Voltaje de operación: 5V DC
- Acoplamiento entre válvula y servo: Madera
- Color de la estructura: Amarillo industrial
- Apertura máxima de la válvula: Máximo 90°
- Giro máximo del Servomotor: Máximo 90°
- Margen de error: 1°
- Tiempo de respuesta máximo: 500 milisegundos

Es importante manejar estas características de diseño ya que esto garantizará el correcto funcionamiento del sistema.

3.5. Diseño del micro controlador

En el siguiente diagrama de flujo se observa la comunicación entre el controlador difuso y el micro controlador.

El micro controlador está constantemente recibiendo datos del sensor ultrasónico y esta a su vez los envía al controlador difuso, el controlador convierte estos datos a porcentajes y empieza a calcular los valores de salida del controlador difuso para poder controlar la servo válvula.

Para poder controlar las electroválvulas que servirán como parada de emergencia o para poder dar el correspondiente mantenimiento, el micro controlador podrá recibir variables (a, b, c y d) que activarán o cerrarán las electroválvulas, así como la orden de giro del servo motor.

Diagrama de flujo del software del Microcontrolador

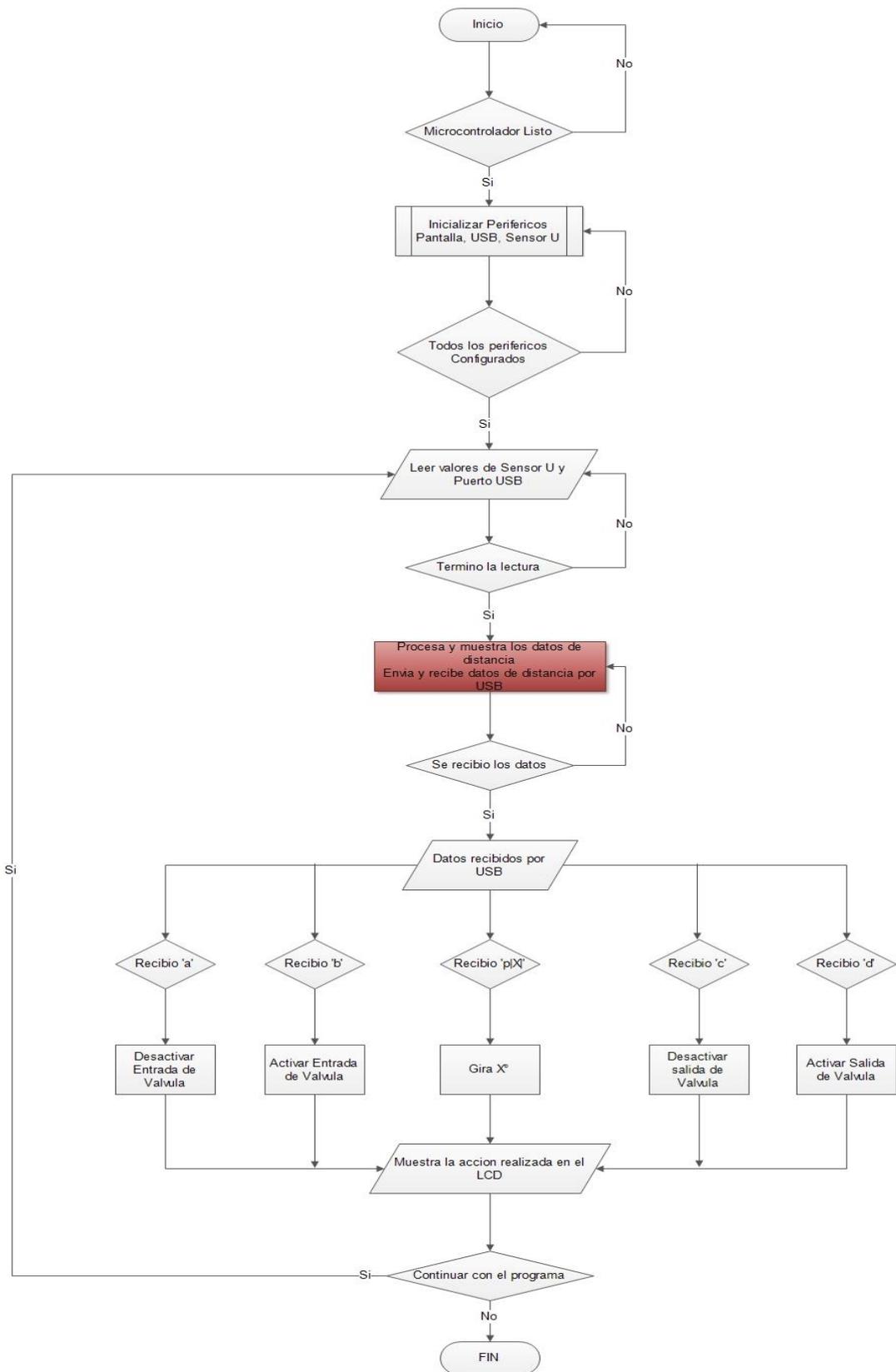


Figura 45: Diagrama de flujo del micro controlador
Fuente: Propia

Para explicar el funcionamiento del micro controlador y sus interacciones con los dispositivos de entrada y salida observaremos la figura 45, que de manera gráfica indica cómo se realiza el control de los periféricos de salida a través de los datos recibidos por el controlador difuso.

Para ello siempre debe estar activo el micro controlador, si este está activo entonces se procederá a realizar la carga del puerto de comunicación y librerías del sensor ultrasónico, puerto USB y pantalla LCD, además de definir las entradas y salidas del sistema; cabe recalcar que el control difuso no se realiza dentro del micro controlador, es decir no está embebido, esto lo realiza la PC en el Entorno Gráfico del Usuario.

Al tener inicializado el puerto de comunicación, el sensor ultrasónico empieza a detectar la distancia y este valor es enviado por el puerto USB al controlador difuso, el cual estará tomando decisiones de apertura y cierre de válvulas según el algoritmo de control que tiene ya programado; por otro lado el controlador difuso para cada valor de entrada tiene una respuesta y esta puede variar dentro del universo de opciones que presenta y con ellos puede abrir y/o cerrar las válvulas.

Para cada valor que recibe se tiene una respuesta:

- “a” entonces desactiva válvula de entrada.
- “b” entonces activa válvula de entrada.
- “c” entonces desactiva válvula de salida.
- “d” entonces se activa válvula de salida.

Pero si recibe el valor de “p|#” se tiene un comportamiento diferente ya que esta codificado y para ello

- “p” = Identificador de ángulo de giro.
- “|” = Carácter de separación.
- “#” = Ángulo que deberá de girar la servo válvula.

Entonces al recibir “p|#”, el sistema entenderá que deberá de girar un ángulo “#” para cumplir con la orden, el valor “|” es solamente una marca, ya que a partir de ese símbolo empieza el número o ángulo que se deberá de girar, si se ve con un ejemplo práctico sería de la siguiente manera:

“Se recibe “p|45” entonces el valor “p” nos indicara que se trabajará sobre la servo válvula y deberá de girar “45°” para poder cumplir la orden.

Una vez ejecutada la orden recibida desde el controlador difuso entonces el sistema estará listo para poder recibir la siguiente orden y así seguir trabajando correctamente

3.6. Diseño del Prototipo de Planta (Etapa de Ozonización)

A continuación se muestra una fotografía de la planta prototipo generado para la realización de pruebas.



Figura 46: Prototipo de planta
Fuente: Propia

Esta planta permite simular el proceso de ozonización, es decir se puede controlar el llenado del tanque de agua imitando al experto humano es decir permitiendo que se llene sin generar rebalses o daños en el equipamiento, a su vez permite registrar todas las ocurrencias que se tengan en el proceso.

3.6.1. Planta

La planta básicamente contiene los componentes necesarios para su operación y control los cuales son:

- 02 electroválvulas (a)
- 02 luces de operación (b)
- 01 servo válvula (c)
- 01 tanque de agua (d)
- 02 sensores ultrasónicos (e)
- Tuberías de conexión (f)

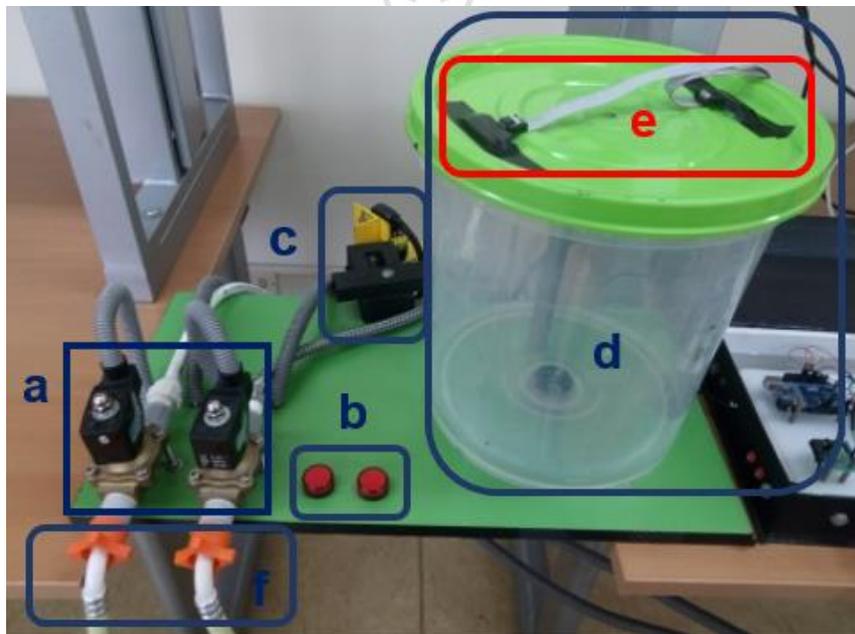


Figura 47: Prototipo de planta y sus componentes
Fuente: Propia

Para tener control y protección del sistema, se tienen dos electroválvulas que controlan la entrada y salida del líquido, pudiendo cerrarse bajo un control manual o automático según el proceso en el cual se esté trabajando, además para los mantenimientos tanto preventivos como correctivos están trabajando en “normalmente cerrado” para no permitir el ingreso o salida del líquido, y también se tiene las luces de operación que permiten saber cuándo están encendidas las electroválvulas mencionadas.

La servo válvula es manejada por el controlador difuso el cual va a poder modular la apertura o cierre de la misma durante todo el proceso, además se tiene configurado un algoritmo de protección el cual verifica constantemente el ángulo de apertura del mismo, este ángulo va de 0° a 90° es decir de abierto a cerrado, si el ángulo de cierre es mayor a 85° entonces automáticamente se enviará la orden de apagado a la bomba de agua para así proteger el sistema y evitar rebalses; el tanque de agua será llenado y vaciado constantemente controlando siempre el nivel que tenga en el momento por dos sensores ultrasónicos de los cuales el primer sensor mide la distancia desde la parte superior hacia la base y según la altura que se mida. Esto permitirá saber en qué nivel de líquido se encuentra el tanque, que cantidad de líquido representa y que porcentaje posee; el segundo sensor ultrasónico está configurado como protección es decir mide el valor del nivel constantemente, pero no realiza ninguna acción con el controlador difuso solo protege del rebalse, para el prototipo se ha configurado a 5 cm. de la parte superior, es decir si la distancia entre el sensor y el líquido es menor a 5 cm. entonces automáticamente se enviará la orden a la electroválvula de entrada de cierre para poder proteger el sistema y no permitir el ingreso de más líquido hasta que este reduzca el nivel.

3.6.2. Tanque.

El tanque prototipo es un balde de 16 litros y 30 centímetros de altura al cual se le han acondicionado un orificio de entrada y salida para poder simular el proceso de llenado; además presenta una tapa con dos sensores ultrasónicos los cuales permiten el control y protección del mismo.



Figura 48: Tanque de agua utilizado para el prototipo: a) Sensor de operación, b) Sensor de protección.

Fuente: Propia

El primer sensor ultrasónico permite realizar las medidas de nivel los cuales serán la entrada al controlador difuso, este será llamado el “sensor de operación”; el segundo sensor ultrasónico también realiza medidas de nivel, pero no serán utilizadas en el controlador difuso, será más bien el “sensor de protección”, el cual impide que el tanque se dañe u ocurran rebales; debido a que constantemente mide el nivel de líquido y a una distancia determinada (para este caso particular será 5cm), dicha distancia podrá variarse según la especificación requerida.

3.6.3. Pantalla LCD

La pantalla LCD será el pequeño control gráfico que tendrá el operario, el cual puede configurarse según la especificación técnica del tanque y/o la mensajería que se requiera.



Figura 49: Pantalla LCD que muestra información básica de capacidad de tanque y distancia

Fuente: Propia

Para el desarrollo de la tesis, la pantalla “LCD” muestra la distancia medida y la cantidad de litros que posee en tiempo real; además muestra mensajes de procesos manuales como “Abriendo Válvula”, “Cerrando Válvula” y “Encendiendo Bomba”; debido a que estos son los mensajes básicos y necesarios que requiere el operador para saber si se está realizando alguna acción o saber qué nivel de líquido está informando el sistema.

3.6.4. Servo válvula

La servo válvula se comunica directamente con el controlador difuso debido a que este es el actuador del sistema a controlar, este presenta una configuración muy particular, ya que consta de dos componentes, la primera

es una válvula convencional de acero el cual permite girarse de 0° completamente abierta hasta 90° completamente cerrada, siendo esta característica fundamental para que pueda acoplarse el segundo componente que es un servomotor, el cual permite que dicha válvula pueda ser girada según la salida del controlador difuso.



Figura 50: Servo válvula acondicionada para la apertura o restricción de líquido al tanque
Fuente: Propia

La función básica de la servo válvula es permitir el ingreso del líquido al tanque y restringirlo gradualmente, según se requiera tratando siempre de imitar al experto humano en el llenado del tanque; existen soluciones de este tipo que son comerciales como son las electroválvulas controladas por corriente las cuales modulan la apertura según se requiera, pero por un tema de costo se prefiere diseñar una propia que se ajusta a nuestra necesidad y además que se pueda controlar fácilmente con mucha precisión.

También se desarrolló un sistema de protección para el servo motor, llamado “sensor de ángulo de giro” dicho sistema censa constantemente el ángulo de giro de la servo válvula y este puede definir un límite de giro que en este caso en particular es de 85°, para que se deje de alimentar la planta, este sistema de protección actuará finalmente apagando la bomba, por lo que dejará de fluir más líquido hacia el tanque y evitará rebalses o un censado incorrecto del nivel de líquido, para este caso será el segundo nivel de respaldo que tendrá este prototipo y detendrá toda la planta; debido a que en sistemas industriales es muy importante tener sistemas de respaldos y protección; entonces se estaría hablando de un arreglo 1+2; el cual indica

que se tiene un sistema de control principal(1) y dos sistemas de respaldo, que son “sensor de protección” y “sensor del ángulo de giro” (ver figura 51).

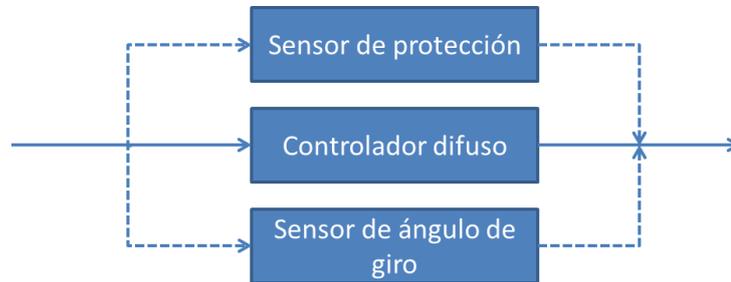


Figura 51: Diagrama de protección del sistema, arreglo 1 +2; 1 sistema principal más 2 sistemas de protección

Fuente: Propia

3.6.5. Electro Válvulas

Las electroválvulas para esta configuración en particular son de 24 VDC con un estado de normalmente cerrada y un diámetro de conexión de $\frac{3}{4}$ de pulgada



Figura 52: Electroválvulas: a) Salida de líquidos, b) Ingreso de líquidos

Fuente: Propia

Fue necesario tener estas características para asegurar la protección de la planta, al tener alimentación de 24 VDC, se garantiza un perfecto cerrado y apertura de la válvula, en caso exista un fuerte caudal estas válvulas lo podrían soportar; la configuración de las electroválvulas en normalmente cerrada es para que no pueda entrar ni salir más líquido cuando está apagado el sistema y se tenga retención.

3.6.6. Fuentes de Poder

Las fuentes de poder son fundamentales y necesarias en la operación de la planta debido a que nos permiten controlar toda la planta, en el prototipo diseñado se requiere de 3 fuentes de poder; una de 24V, 12V y una de 05V, las cuales nos permiten tener aisladas cada una de las etapas de la planta, debido a que unas fuentes son de operación y otra de control.



Figura 53: Fuentes de poder utilizadas en el prototipo: a) 24 V, b) 12 V
Fuente: Propia

La primera fuente es la de 24 VDC la cual se utiliza para la operación de las electroválvulas, es decir para poder abrir o cerrar las electroválvulas; la segunda fuente es la de 12 VDC esta es utilizada para el control de los relays para activar o desactivar algún actuador en nuestro caso particular sería abrir y cerrar las electroválvulas, y activar o desactivar la bomba de agua; y la tercera fuente se utiliza para controlar la servo válvula, debido a que este al tener conectado un servomotor que generara un torque de 15Kg/cm² y este requiere un voltaje mínimo de 5 voltios y una corriente de 2 amperios para poder generar el giro del servo.

3.6.7. Tablero de Control

El tablero de control es la parte más importante de la planta porque en el tablero se encuentran todas las conexiones de los componentes, el tablero cuenta con el controlador, el cual permite que todo trabaje en armonía y den la seguridad necesaria al operario; dentro del tablero se encuentran 4 tarjetas las cuales son:

- 01 Controlador (a)
- 01 Interfaz de alimentación de 5VDC (b)
- 01 interfaz de protección de 12VDC a 24VDC (c)
- 01 Interfaz de protección de 12VDC a 220VAC (d)

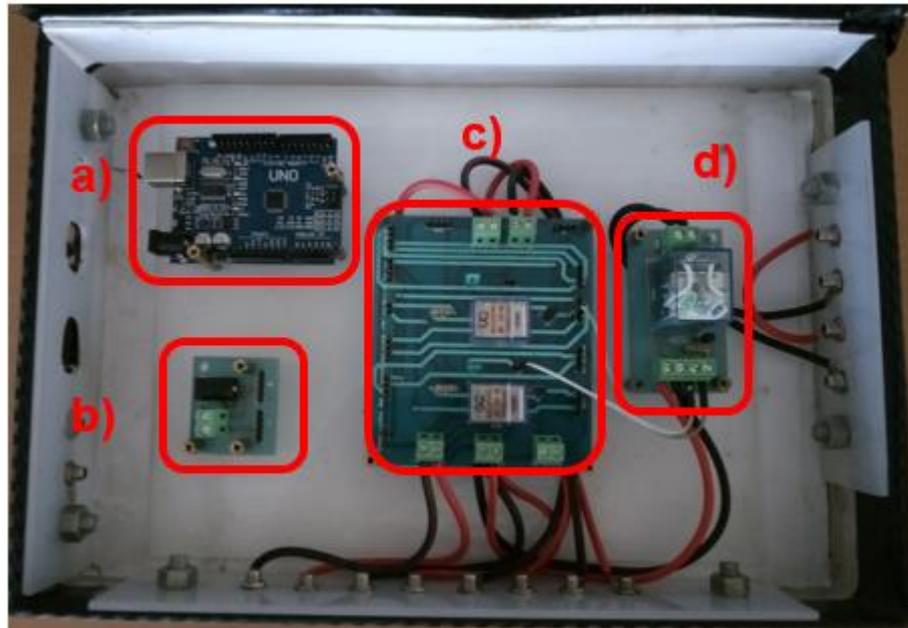


Figura 54: Tablero de control de prototipo
Fuente: Propia

El controlador posee todas las conexiones para así poder controlar cada una de las entradas y salidas del sistema, además de tener el puerto de comunicación USB que se conecta a la interfaz gráfica del operario; para poder alimentarla tenemos también la interfaz de alimentación de 5VDC que alimenta al controlador para que este pueda operar, la interfaz de protección trabaja con relays de 12 VDC y activa las electroválvulas de 24 VDC, estas poseen su protección eléctrica además de comunicar al controlador con los actuadores y por último la interfaz de protección para la bomba de agua la cual se activa con 12 VDC que permite activar o desactivar la misma utilizando un relay de 220 VAC para su operación.

3.6.8. Bomba de agua

Para poder realizar una buena simulación prototipo se debe considerar un flujo constante de ingreso de líquido el cual permita poder probarlo en cada uno de sus niveles, poder saber cómo responde y cómo este respondería a

los diferentes cambios de niveles de líquido, para ello se dispone de una bomba de agua de 0.5 HP, fuerza suficiente para tener un flujo continuo sin que se dañe el prototipo.



Figura 55: Bomba de agua usada en el prototipo
Fuente: Propia

3.7. Diseño de entorno gráfico para la visualización

A continuación se muestra el entorno gráfico que se le mostrará al usuario para que visualice el proceso de llenado de tanques.

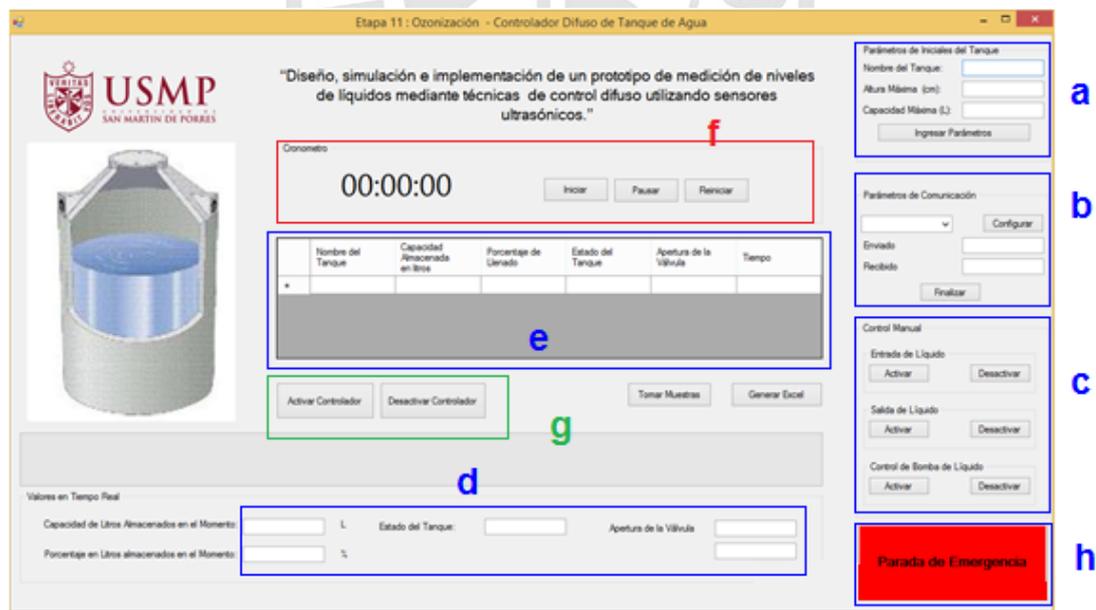


Figura 56: Diseño final del entorno del operador
Fuente: Propia

A continuación se detalla cada uno de los parámetros a ingresar, así como el funcionamiento de cada campo del entorno gráfico.

a. Parámetros iniciales

Los parámetros iniciales a ingresar son el volumen total del tanque expresado en litros y este no debe superar los 1000 litros, la altura del tanque expresada en centímetros y esta altura no debe sobrepasar los 150 cm., finalmente el nombre del tanque puede incluir letras y números y es necesario que se le coloque el nombre.

b. Puertos de comunicación

Se debe elegir el puerto COM correspondiente para la emisión y recepción de datos, si se elige un puerto inexistente saldrá un mensaje de error y se deberá elegir el puerto correctamente.

c. Control manual

El control manual se usa para cerrar las electroválvulas manualmente, para poder cambiar de tanque o hacer los respectivos mantenimientos.

d. Valores obtenidos

En este campo se observan los valores obtenidos por el sensor, el volumen esta expresado en litros y la altura esta expresada en porcentajes, además se visualiza los valores en tiempo real del controlador difuso, se puede observar estado de acierre de la servo válvula.

e. Registro Excel

Esta opción nos permite generar un Excel de las mediciones obtenidas, la toma de datos se hará cada segundo y al final se exportará en un Excel para tener un reporte y así analizar el comportamiento del llenado de líquido.

f. Cronómetro

Esta opción sirve para medir el tiempo de llenado de líquido y así poder tener un reporte del mismo.

g. Controlador difuso

Esta opción nos permite iniciar o desactivar el controlador difuso, una vez iniciado este proceso el controlador empieza a ejecutar las reglas y a la salida envía un ángulo de giro para controlar la servo válvula.

h. Parada de emergencia

Esta opción permite detener el controlador difuso así como la parte hardware de la planta, al darle un clic al botón de parada de emergencia se detiene el controlador difuso y en el segundo clic se detiene toda planta.

En la figura 56 se observa el diagrama de flujo de cómo ha sido elaborado el entorno gráfico donde se observa la variación del control difuso y la ejecución de las reglas, este entorno fue realizado en *“Microsoft Visual Studio C Sharp”*.

En la figura 57 se observa el diagrama de flujo del controlador difuso que se utilizó en la presente tesis, en ella se muestran todas las etapas a ejecutarse en el programa del controlador.

En la figura 58 se observa el diagrama de registros utilizados de la función *“DotFuzzy”* incluida en *“C Sharp”*

Finalmente en la figura 3.28 se observa el diagrama de flujo del registro del controlador difuso presentado en esta tesis.

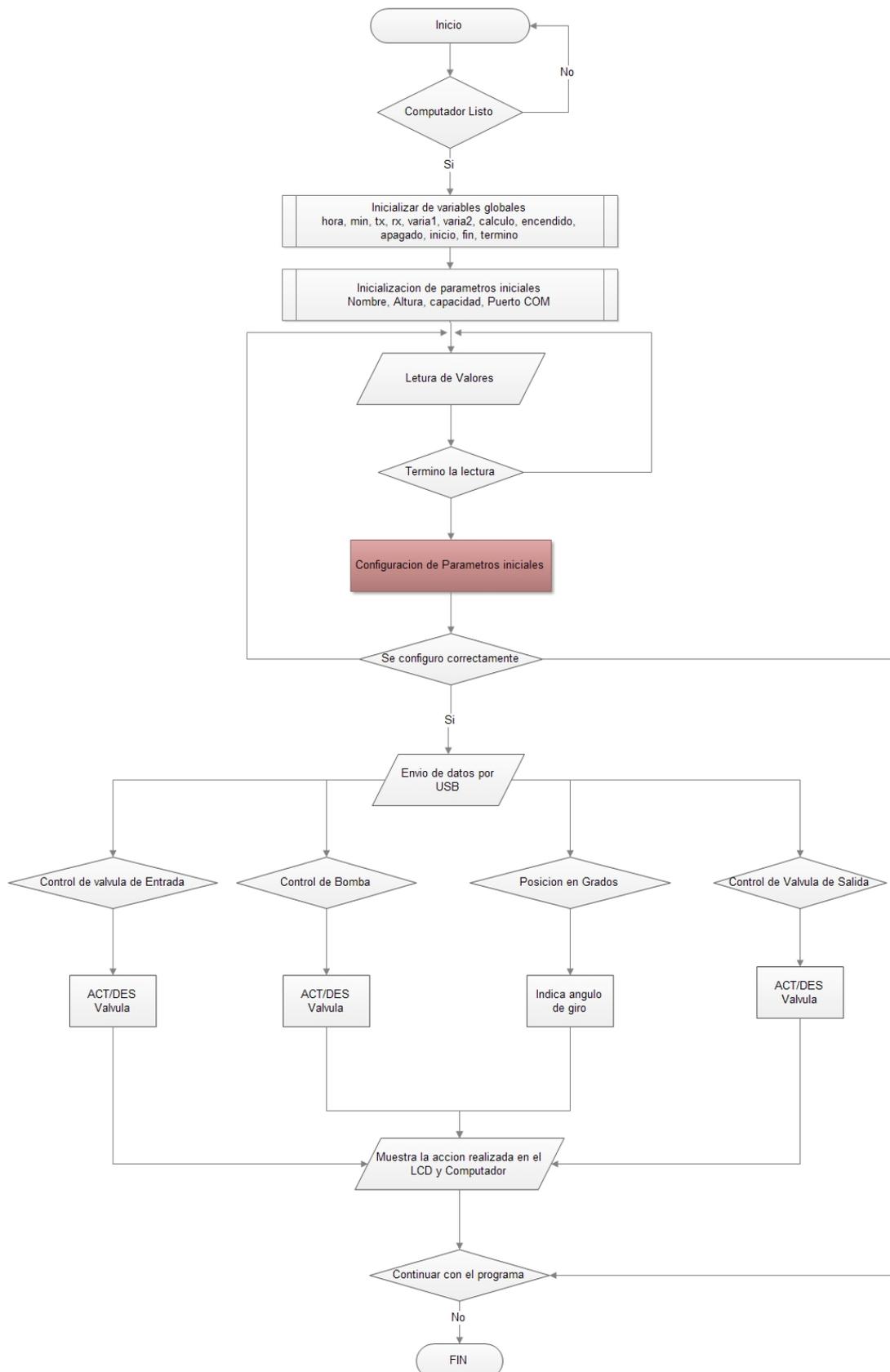


Figura 57: Diagrama de flujo del control interno del entorno gráfico
Fuente: Propia

Para controlar el entorno gráfico se tiene un control definido y este se observa claramente en la figura 56; para ello el computador debe estar encendido y conectado al micro controlador por el puerto USB; se inicializan las variables globales con las características del tanque que son capacidad y altura para a partir de ellos realizar los cálculos necesarios.

Una vez configurado los valores iniciales, se empieza a recibir los valores en centímetros medidos por el controlador para poder procesarlos por el controlador difuso y generar la respuesta del sistema.

Estos valores enviados se ven reflejados en los actuadores que generaran la apertura o cierre de las válvulas, indicarán el giro de la servo válvula y mostrarán los mensajes en el LCD.



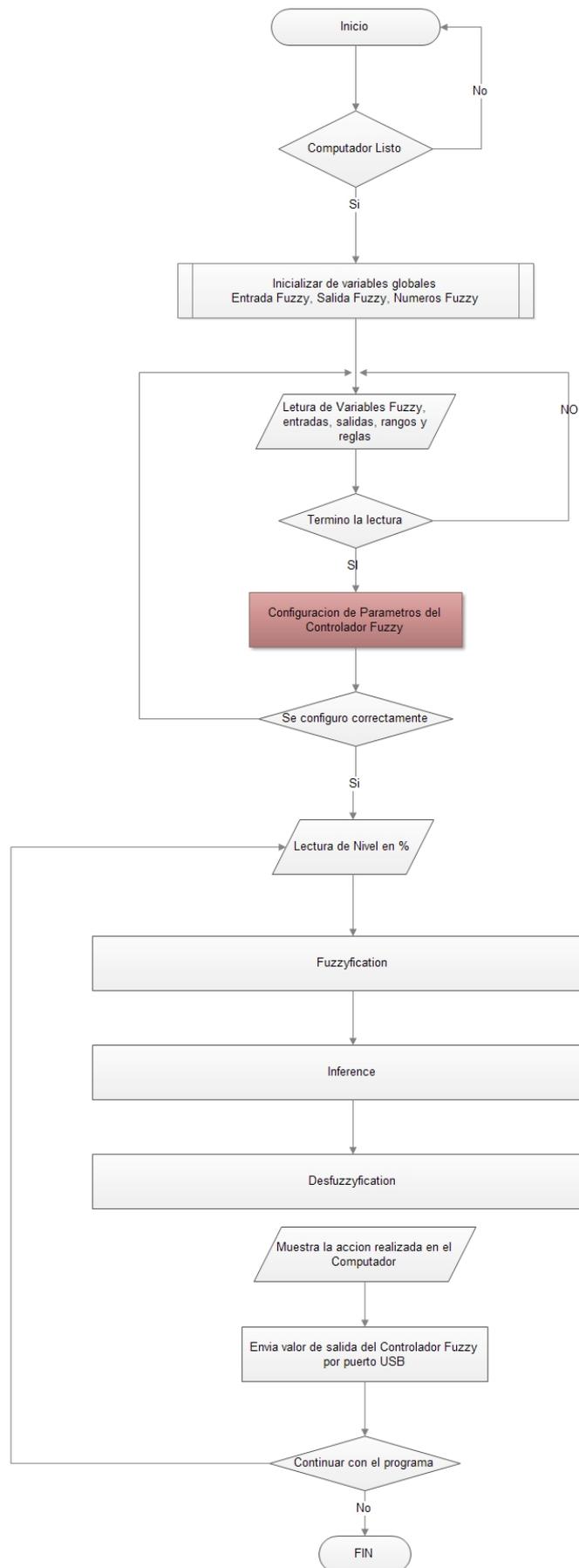


Figura 58: Diagrama de flujo del controlador difuso
Fuente: Propia

Para el controlador difuso también se tiene un flujo el cual debe de ser cumplido y este se observa en la figura 57; al tener el computador activo y el entorno gráfico de usuario ya conectado al micro controlador, previamente se configuraron los parámetros iniciales, se configuraron las variables globales y se está recibiendo el valor de la distancia por el puerto USB, entonces se dará inicio al controlador difuso, el cual también tiene sus propias variables de operación para cada una de las etapas.

Se leen los valores de las variables propias del controlador difuso, al terminar de ser leídas se configuran los parámetros de operación del controlador difuso que son los 5 niveles de entrada, las reglas y los 3 niveles de salida.

Una vez que se tiene configurado se realiza la lectura del nivel en porcentaje “%” que son valores de 0 a 100, este valor ingresa a la etapa de fusificación en la cual se convierte el valor numérico en una variable tipo fuzzy que tiene un rango de probabilidad de ocurrencia dentro de los 5 niveles de entrada ya definidos, en la etapa de inferencia, se aplican las reglas a este valor de entrada para poder tener una respuesta del sistema; y finalmente este valor tiene que ser defusificado para convertir esta variable en una que pueda entenderla el sistema y ejecutarla en los actuadores.

Con la respuesta final del sistema, se muestra la acción realizada en el entorno gráfico del operario, se envía la salida al micro controlador para que ejecute la acción.

Al terminar el proceso, si se tiene un valor en la entrada del sistema, se seguirá operando de forma continua y en tiempo real.

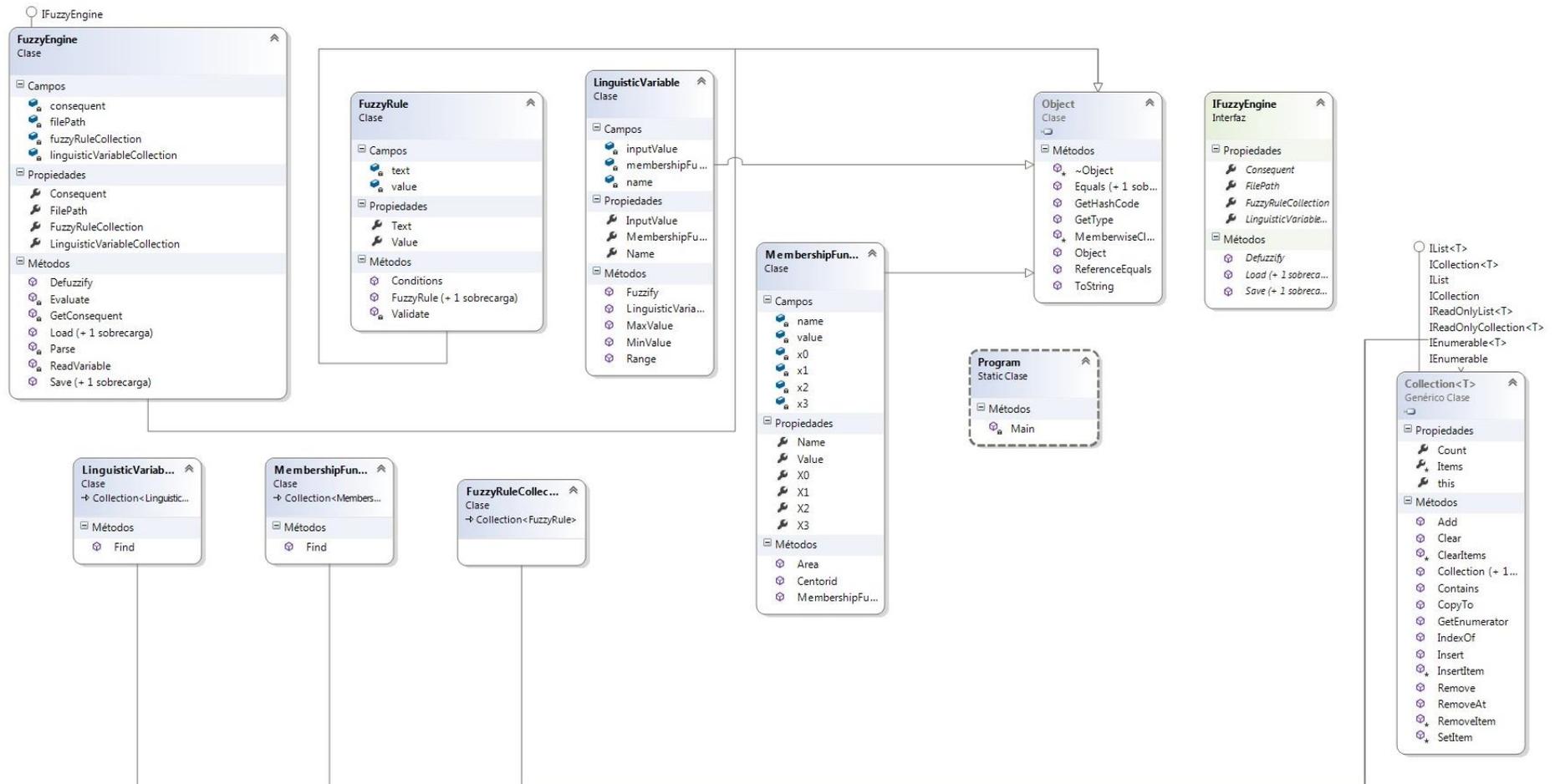
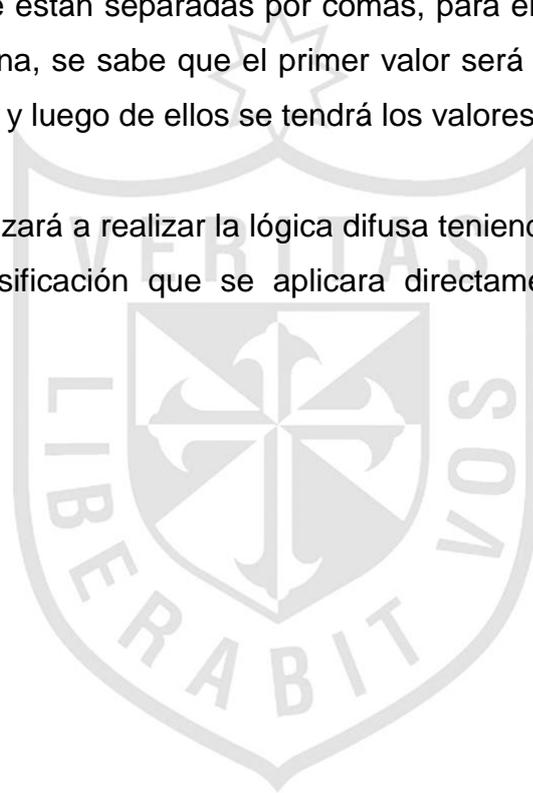


Figura 59: Diagrama de clase DotFuzzy utilizado para implementar el controlador difuso
Fuente: Propia

En la figura 58 Se muestra la distribución de las funciones creadas para poder generar el controlador difuso, la definición de variables lingüísticas, funciones de membrecía, controlador de regla; todo ello integrado en el “*FuzzyEngine*”; para poder definir las reglas utiliza la función “*find*” que segmenta las reglas teniendo en cuenta que siempre se tiene definido un antecedente y un consecuente y estos están divididos por la palabra “*then o entonces*”.

Para las variables lingüísticas y funciones de membrecía, se tiene definida una estructura que están separadas por comas, para ello cuenta los valores que tiene la cadena, se sabe que el primer valor será el valor el nombre la variable lingüística y luego de ellos se tendrá los valores de la misma.

Con ellos se empezará a realizar la lógica difusa teniendo como respuesta la salida de la defusificación que se aplicara directamente a la salida del sistema.



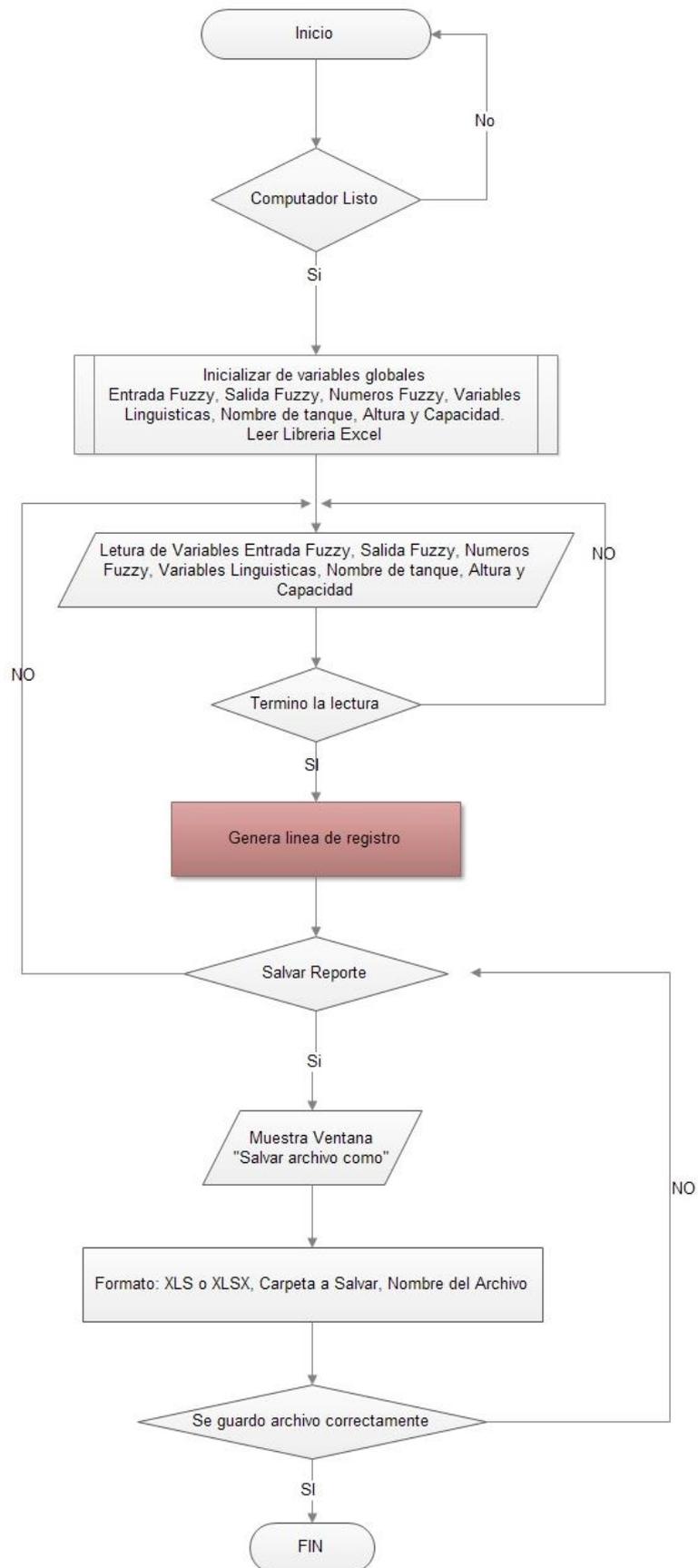
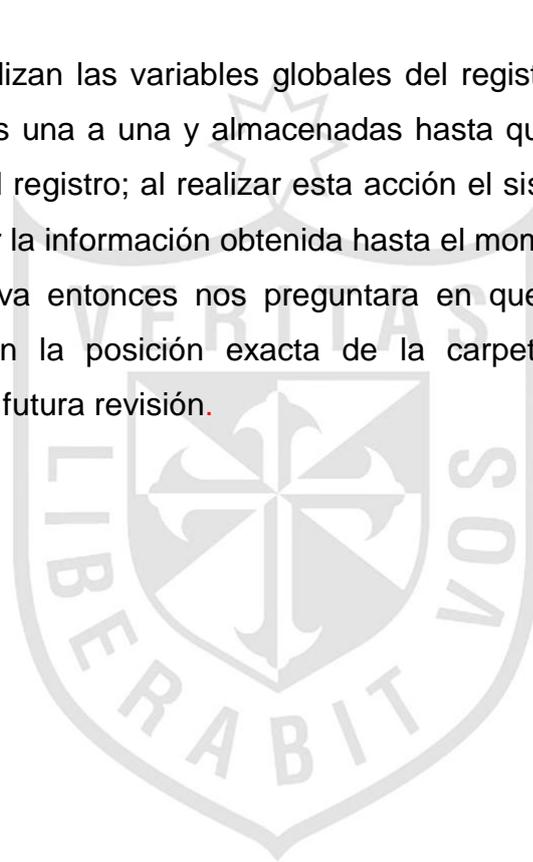


Figura 60: Diagrama de flujo de registro del controlador difuso
Fuente: Elaborado por los autores

La generación de reportes es fundamental en la industria ya que nos ayuda a la toma de decisiones o poder coordinar los mantenimientos preventivos y/o correctivos, en la figura 59 Se muestra como se realiza el proceso.

Al tener el computador operando, con el micro controlador activo y conectado, con los parámetros iniciales ya configurados y el controlador difuso puesto en marcha y atendiendo las entradas del sistema entonces se empezará a tomar registro de las actividades.

Para ello se inicializan las variables globales del registro de operaciones y estas son tomadas una a una y almacenadas hasta que el operario decida realizar un corte al registro; al realizar esta acción el sistema nos indicará si deseamos guardar la información obtenida hasta el momento, si se tiene una respuesta afirmativa entonces nos preguntara en que formato deseamos salvarla, junto con la posición exacta de la carpeta donde deseamos guardarla, para su futura revisión.



CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Pruebas a ejecutar

Para poder alcanzar los objetivos de la tesis, se debe lograr, que el llenado del tanque cumpla con todos los parámetros necesarios en la operación en todas sus funciones como calibración, visualización, control y monitoreo para ello hemos desarrollado un plan de pruebas analizando y evaluando cada uno de los casos de uso que intervienen en el proyecto.

4.2. Pruebas a evaluar y controlar

- Pruebas del sensor ultrasónico
- Pruebas de interfaz de operador
- Pruebas del controlador difuso (fuzzy controller)

Para las pruebas se utilizaron los siguientes materiales

- 01 sensor ultrasónico, para que mida la distancia constantemente
- 02 tanques plásticos de aproximadamente 30 cm de alto; para controlar el nivel de líquido ingresado.
- 02 electroválvulas ON/OFF (3/4 de pulgadas). Para controlar el paso del líquido al tanque.
- 01 Bomba de agua de 0.5HP. Para poder suministrar agua al sistema a controlar.
- 01 Tarjeta de control de electroválvulas.
- 01 Válvula de paso controlada por Servomotor. Para poder controlar la apertura, según el requerimiento del controlador.
- 01 computadora personal
- 01 LCD
- 01 Cable USB
- 03 Fuentes de poder
- Varias Mangueras
- Varios tubos de conexión de agua

En las pruebas realizadas, el llenado del tanque se realizó con agua fría y colorante para demostrar el nivel. No se trabajó con otros tipos de líquidos con densidades mayores o menores a 1.000 Kg/m³.

El plan de prueba y de los casos de uso se especifica con más detalle a continuación en la tabla 11.

Tabla 11: Pruebas de lectura de distancia

Nombre de Prueba	Caso de uso
Pruebas del sensor ultrasónico.	- Lectura de distancias.
Pruebas del acondicionador de Señal.	- Ningún caso de Uso Asociado.
Prueba de la interfaz USB.	- Transmisión y recepción de datos a la Tarjeta de Adquisición.
Pruebas de entrada de datos al PC.	- Registrar de datos del tanque.
Pruebas de interfaz de operador	- Proceso llenado del tanque - Visualización de la respuesta del sistema. - Ingreso de parámetros
Pruebas de las funciones de membresía para el control difuso.	- Ejecución de las Funciones de Membresía. - Ejecución de Reglas del controlador

Fuente: Propia

4.2.1. Pruebas del sensor ultrasónico

Las mediciones obtenidas del tanque con líquido son los que se muestran en la tabla 12, se tomaron aproximadamente 10 mediciones y se observó que el sistema era estable, cabe resaltar que para mejores resultados se mostrarán valores promediados de 10 muestras, en la figura 60 se muestra los valores obtenidos y mostrados por el puerto serial.

Tabla 12: Mediciones del sensor ultrasónico

Número de Medición	Resultado
1	16 cm
2	16 cm
3	16 cm
4	16 cm
5	16 cm
6	16 cm
7	16 cm
8	16 cm
9	16 cm
10	16 cm

Fuente: Propia

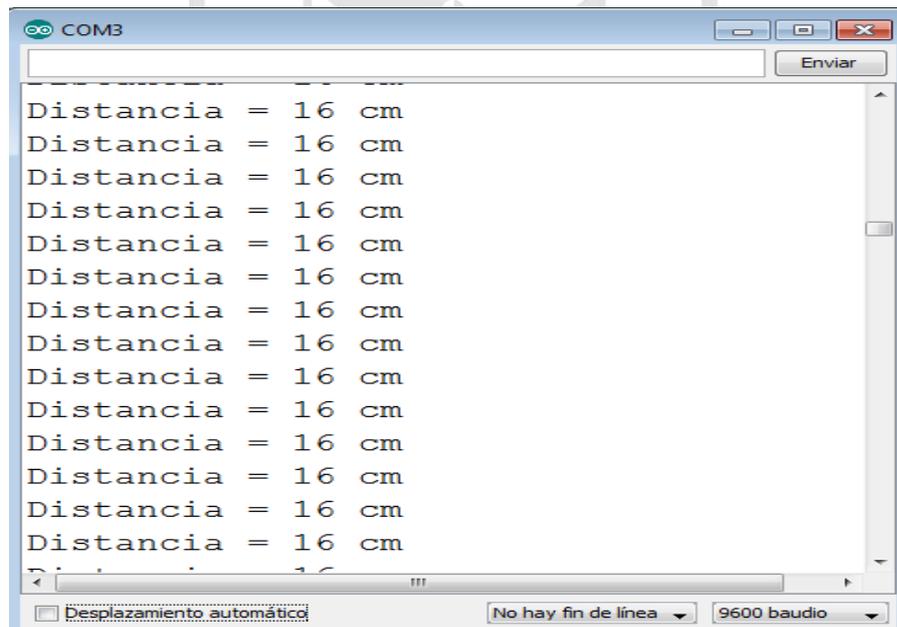


Figura 61: Valores obtenidos por puerto serial

Fuente: Propia

Las mediciones con un tanque de aproximadamente 15 centímetros de alto y medio lleno de agua se muestran en la tabla 13, se observó que las mediciones son estables.

Tabla 13: Mediciones obtenidas en tanque a medio llenar

Número de Medición	Resultado
1	7 cm
2	8cm
3	8cm
4	8cm
5	8cm
6	8cm
7	8cm
8	8cm
9	8cm
10	8cm

Fuente: Propia

En la figura 61 Se observa los resultados obtenidos del puerto serial con las mismas especificaciones del tanque que se usó en la tabla anterior.

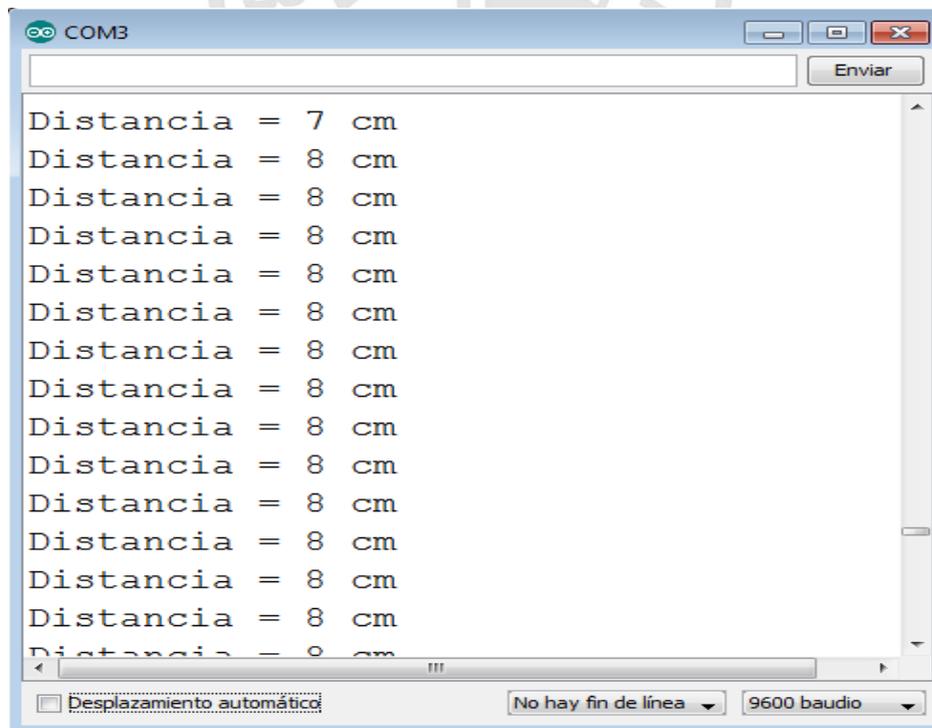


Figura 62: Resultados obtenidos con tanque medio lleno

Fuente: Propia

Para determinar la linealidad del sensor se hizo una tabla comparando distancia versus tiempo de vuelo de la señal y se obtuvo los valores de la tabla 14, graficando los resultados en la figura 62 se observa que el sensor tiene una respuesta lineal, en la abscisa se ve la distancia del sensor ante un objeto y en la ordenada se ve el tiempo que toma la señal en ir y venir del sensor hacía el objeto, esta distancia se muestra en microsegundos.

Tabla 14: Mediciones de distancia y tiempo de espera de la señal rebotada

Distancia	Tiempo (useg)	Distancia	Tiempo (useg)
1	0	16	925
2	0	17	985
3	167	18	1041
4	221	19	1099
5	312	20	1135
6	340	21	1209
7	392	22	1263
8	469	23	1324
9	523	24	1381
10	590	25	1435
11	646	26	1494
12	705	27	1547
13	757	28	1607
14	810	29	1674
15	871	30	1730

Fuente: Propia

Se observa en la figura 62 que la respuesta del sensor es lineal, por ello se procederá a hacer el respectivo cálculo de la ecuación que describe dicha función.

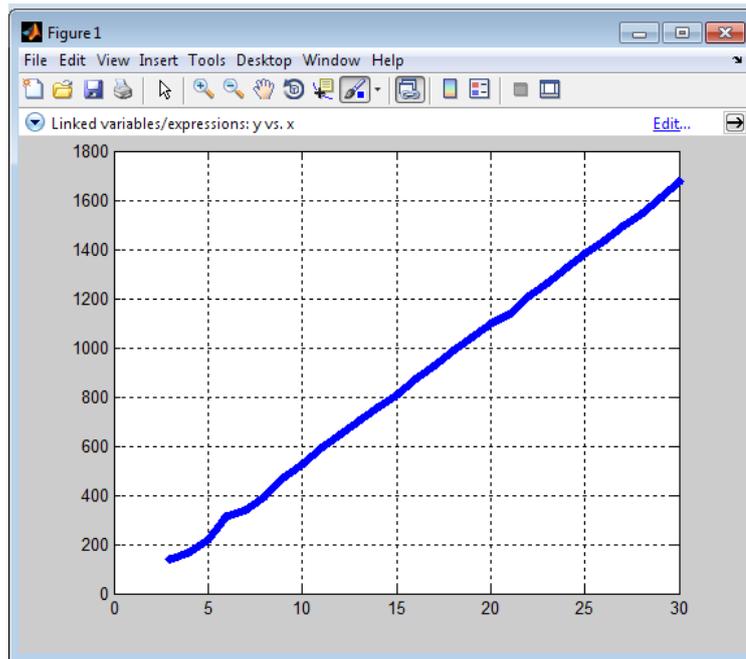


Figura 63: Grafica de distancia VS tiempo de espera de rebote de señal
Fuente: Propia

Se toma dos puntos cualquiera de la gráfica o de la tabla 14, para nuestro caso se usará:

$$P_1 = (a_1, b_1) = (16, 871)$$

$$P_2 = (a_2, b_2) = (18, 985)$$

A continuación se procede a calcular la pendiente de la ecuación.

$$m = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} \tag{17}$$

$$m = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} = \frac{985 - 871}{18 - 16} = 57$$

Se procede hacer el cálculo de la ecuación de la respuesta del sensor en la siguiente ecuación:

$$b - b_1 = m(a - a_1) \tag{18}$$

Reemplazando los valores en la anterior:

$$b - 871 = 57(a - 16)$$

Y finalmente se obtiene como ecuación lo siguiente:

$$b = 57a - 41 \quad (19)$$

La ecuación 19 le pertenece a la figura 52.

Para el caso en particular el tanque que se tiene en planta de embotellamiento de garrafones tiene como altura 1.5 metros y el tanque prototipo con el que se hacen las pruebas del controlador tiene una altura de 0.3 metros; al realizar las medidas con el sensor ultrasónico por efecto de redondeo a un número entero se estarías introduciendo un error de medida de 0.005 metros lo cual es una medida bastante pequeña y despreciable para el proceso, si se desearía tener el error en porcentaje será de 0.33% y en el prototipo el error será de 1.67%.

Tabla 15: Error introducido por redondeo

Error introducido por redondeo = 0.05 metros		
Tanque Real	0.33%	1.5 m.
Tanque Prototipo	1.67%	0.3 m.

Fuente: Propia

4.2.2. Pruebas de interfaz de operador

En la prueba del llenado en el entorno gráfico, se tuvo un inconveniente en mostrar la visión en tiempo real, el cual se resolvió agregando “timers” que realizan en un barrido de la señal cada segundo, además se realizó pruebas con el sensor ultrasónico y este generaba errores aleatorios, este error generaba un valor de distancia igual a “517”, si este valor aparece en el sistema, este deberá de cerrarse por protección y no permitir el ingreso de más líquido, el operador deberá de realiza las verificaciones necesarias de funcionamiento así como las conexiones, además este valor de error aparecerá en el valor de dato recibido.

Para las pruebas a realizar en la interfaz gráfica del operador se deberá de cumplir las siguientes características:

Descripción:

- Se visualiza el entorno visual en el cual el operador pueda manejar toda la etapa

Actores:

- Operador

Condiciones necesarias:

- El operario debe realizar el conexionado de manera correcta (fuentes, sensores, mangueras y micro controlador).
- Llenar los parámetros iniciales.
- Sensor en óptimas condiciones sin ruido o interferencias.

Caso de éxito:

- Se registra todos los parámetros de forma correcta y se genera el reporte en Excel.
- Se visualiza el todo el proceso de llenado con éxito.

Caso de error:

- No se leen las distancias correctamente debido al ruido generado por mala conexión.
- No se visualiza el proceso de llenado correctamente debido a una mala configuración.

Resultados:

- Se visualiza el entorno grafico mostrando una barra progresiva del llenado de tanque.

Al realizar pruebas de envió de datos aleatorios por el puerto serial, se generaba una trama cortada, es decir si se enviaba una distancia igual a “27” centímetros en el entorno del operario se recibía el valor “7” centímetros generando así un sobresalto en la barra de llenado y en la respuesta del controlador. Para solucionar este sobresalto se utilizó algoritmos de controles como promediados, valores máximos, eliminación de datos y error mínimo, pero estos reducían el error mas no eliminaban, la solución final fue realizar la sincronización de transmisión y recepción entre el micro controlador y el entorno de operario.

Otra prueba realizada fue la verificación del cierre máximo de la válvula cuyo ángulo de giro es de 90°, donde ya no se permite el ingreso de más líquido en el tanque, entonces se midió en el entorno gráfico donde se obtuvo un valor del 90% con 27 centímetros de altura, este valor obtenido nos asegura un cierre total de la valvular, pero al realizar las medidas de forma manual (con una regla), se obtuvo un valor en promedio de 26.3 centímetros, lo cual da un valor de 87.6% del llenado de tanque, con lo que en promedio se genera un error de 2.4%, el requerimiento es no tener un error mayor al 5% con lo cual se estaría satisfaciendo esta condición.

Tabla 16: Promedio de muestras vs. Promedio del controlador

N° de muestra	Llenado en %	Altura de llenado en cm.
1	88.50%	26.6
2	87.20%	26.2
3	87.60%	26.3
4	87.80%	26.3
5	87.20%	26.2
6	87.40%	26.2
7	87.30%	26.2
8	87.80%	26.3
9	87.40%	26.2

	Llenado en %	Altura de llenado en cm.
Promedio de muestras	87.60%	26.3
Promedio de controlador	90%	27

	Error medido	Error admitido
Porcentaje de error	2.40%	5%

Fuente: Propia

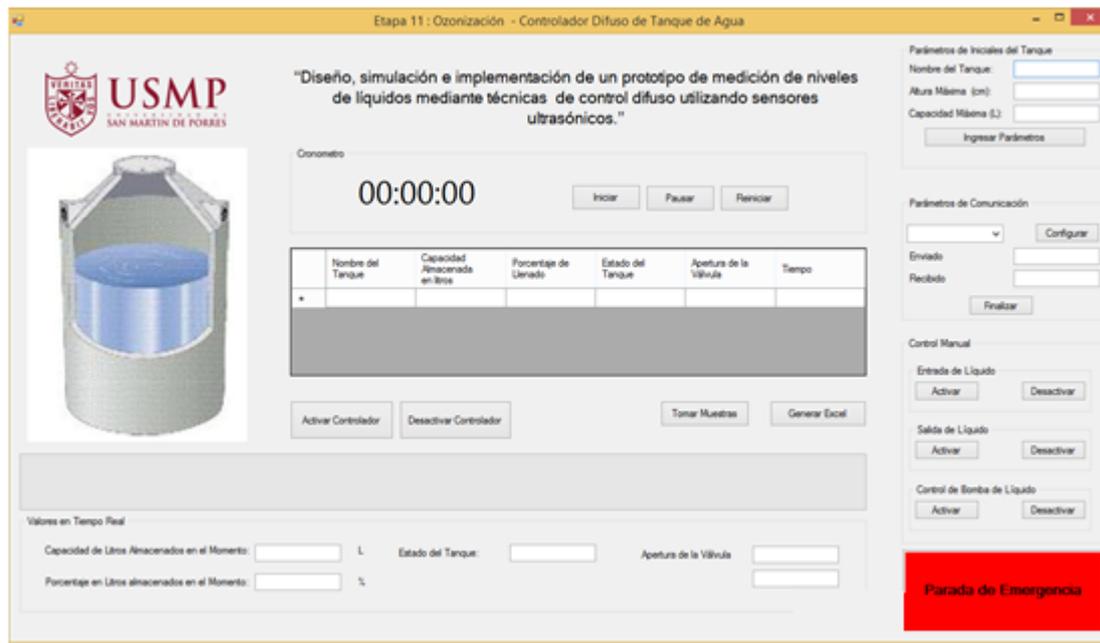


Figura 64: Interfaz de operador
Fuente: Propia

Para poder registrar todas las acciones realizadas por el controlador difuso se deberá de tener en consideración los siguientes detalles:

Descripción:

- Se genera documento de Excel donde se muestra segundo a segundo como avanza el proceso de llenado en sus parámetros de porcentaje de llenado, cantidad de litros, nivel de entrada, etc.

Condiciones necesarias:

- El operario debe realizar el conexionado de manera correcta (fuentes, sensores, mangueras y micro controlador).
- Llenar los parámetros iniciales.
- Sensor en óptimas condiciones sin ruido o interferencias.

Caso de éxito:

- Se genera reporte en Excel.

Caso no exitoso:

- No se obtiene el documento con los parámetros del llenado debido a que no se ingresaron correctamente los parámetros iniciales tales como el nombre de tanque, altura o capacidad.
- No se obtienen los valores correctos debido a un daño en el sensor ultrasónico.
- Se muestra error 517, porque el sensor está dañado o no está conectado.

Resultado:

- Se obtiene libro de Excel en formato "xls" o "xlsx".

Tabla 17: Resultado en promedio de tiempos de llenado

Nombre del Tanque	Tiempo llenado (mm:ss)	Altura tanque(cm)	Datos sensor(cm)
TQ-001-CP	1:36	27	26.90
TQ-002-CP	1:24	27	26.90
TQ-003-CP	1:23	27	26.88
TQ-004-CP	1:18	27	26.88
TQ-005-CP	1:28	27	26.89
TQ-006-CP	1:14	27	26.95
TQ-007-CP	1:13	27	26.90
TQ-008-CP	1:15	27	26.85
TQ-009-CP	1:26	27	26.75
TQ-010-CP	1:28	27	26.66
TQ-011-CP	1:20	27	26.70
TQ-012-CP	1:21	27	26.90
TQ-013-CP	1:20	27	26.80

Fuente: Propia

Las pruebas de la recepción de los datos al computador, fue un extenso por la series de fallos que encontramos en todo el transcurso de la implementación del proyecto, uno de ellos fue la mala manipulación de la entrada de voltaje al micro controlador y la bomba por la cual el puerto COM

se cerraba y no transmitía la información necesaria para manipularlas en el computador.

Se soluciona el problema calculando el voltaje ideal en cual podía funcionar normalmente. En cada prueba de llenado de tanque se midió el la altura real y compara con la altura que se registraba.

Luego de poder recibir los datos correctamente al computador por medio del sensor, se obtuvo fallos de transmisión de envío del computador a la tarjeta de adquisición de datos, para indicarle el prendido y apagado de las electroválvulas. El motivo fue un colapso debido a que el puerto COM no está inicializado correctamente.

En todas las pruebas realizadas al interfaz del operario teniendo ya conectados todos los dispositivos, el resultado fue satisfactorio ya que se logra alcanzar con exactitud los niveles deseados del sistema.

Todos los parámetros son capturados en la interfaz, el puerto de comunicación responde de manera constante tanto en transmisión como en recepción, el controlador difuso va variando según la medida o distancia que se va obteniendo en el sensor ultrasónico.

Existieron algunas complicaciones en las conexiones de agua ya que al tener el sistema funcionando constantemente por la presión o cantidad de flujo, empiezan a aparecer gotas de agua en entre las uniones, en esos casos particulares lo que se realizó fue mejorar el sellado de las uniones para evitar fugas y deterioros.

4.2.3. Pruebas de interfaz de operador simulando un tanque de mayor capacidad

En la prueba del llenado realizando una simulación de un tanque de mayor capacidad, se utiliza la misma planta prototipo, solo que esta vez se ingresa el valor de 100cm con lo cual siempre se tendrán 70cm fijos y según vaya ingresando el líquido variara esos 30cm restantes.

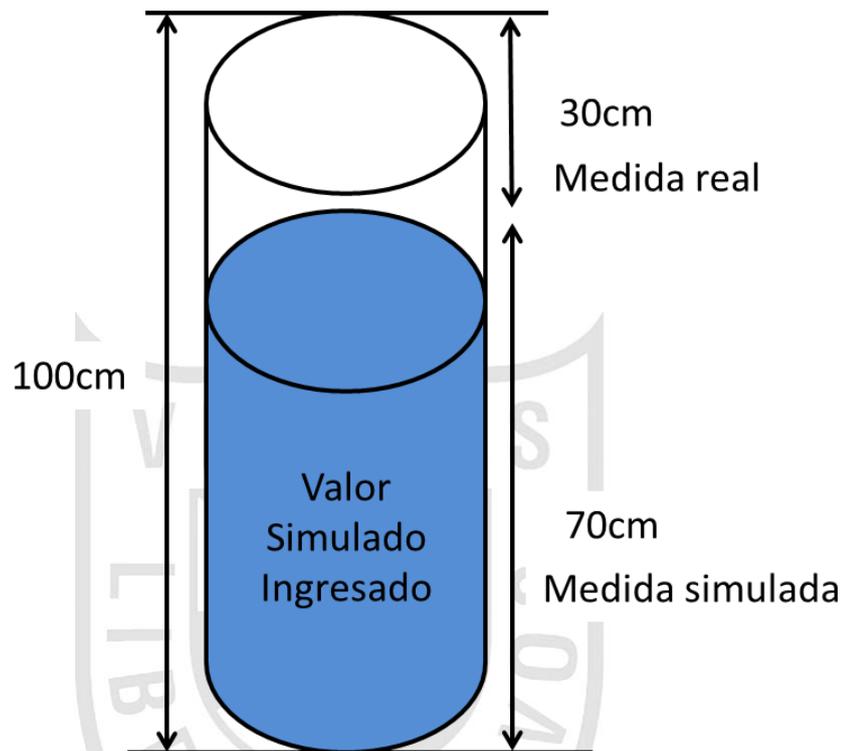


Figura 65: Simulación de tanque con volumen de 1000 litros y 100 cm. De altura
Fuente: Propia

Como se muestra en la figura 64 la parte inferior es el valor fijo de 70cm y la superior es la variante (30cm), con esta prueba se puede simular un tanque de mayor capacidad y teniendo un umbral de 70, y si se opera el controlador difuso nos generaría la tabla 18, con la cual se observa la variación y podemos poner en prueba apagado de la bomba cuando supero el umbral definido, en este caso en particular es de 86°.

Tabla 18: Toma de medidas de tanque simulando 100 cm. de altura

Nombre del Tanque	Capacidad Almacenada en litros	Porcentaje de Llenado	Estado del Tanque	Apertura de la Válvula	Tiempo
TQ100	78	78	Lleno	Medio	00:00:27
TQ100	78	78	Lleno	Medio	00:00:28
TQ100	79	79	Lleno	Medio	00:00:29
TQ100	79	79	Lleno	Medio	00:00:30
TQ100	79	79	Lleno	Medio	00:00:31
TQ100	80	80	Lleno - Crítico	Medio	00:00:32
TQ100	80	80	Lleno - Crítico	Medio	00:00:33
TQ100	80	80	Lleno - Crítico	Medio	00:00:34
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:35
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:36
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:37
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:38
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:39
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:40
TQ100	81	81	Lleno - Crítico	Medio - Cerrado	00:00:41

Fuente: Propia

Esta simulación de tanque de mayor capacidad permite comprobar el funcionamiento del algoritmo de protección diseñado, además este es el primer nivel de seguridad que se activa en el sistema el cual comprueba el ángulo de giro, y la distancia medida por el segundo sensor quedaría como un segundo nivel de protección; en el supuesto que se pierda el control de la planta o la servo válvula no responda como se tiene previsto, es decir llega al umbral definido (85°) y permite el ingreso de más líquido al tanque, entonces sale a responder el segundo algoritmo de protección que valida que la distancia siempre sea mayor a 5cm en caso sea menor automáticamente pedirá que se desactive la electroválvula de entrada y no ingresará más líquido al tanque para que este no genere rebalses o daños por exceso.

Para las pruebas a realizar en la interfaz gráfica del operador se deberá de cumplir las siguientes características:

Descripción:

- Verificación del entorno visual en el cual el operario puede manejar toda la etapa.

Actores:

- Operador

Condiciones necesarias:

- El operario debe realizar el conexionado de manera correcta .
- Llenar los parámetros iniciales (Altura: 100 cm y Capacidad: 100 litros).
- Sensores en óptimas condiciones sin ruido o interferencias.

Caso de éxito:

- Se registra todos los parámetros de forma correcta y se genera el reporte en Excel.
- Se visualiza el todo el proceso de llenado con éxito.

Caso de error:

- No se leen las distancias correctamente debido al ruido generado por mala conexión.
- No se visualiza el proceso de llenado correctamente debido a una mala configuración.
- No responderán los algoritmos de protección adecuadamente.
- Daños en el tanque de liquido

Resultados:

- Se visualiza el entorno grafico mostrando una barra progresiva del llenado de tanque.

Tabla 19: Respuesta del controlador difuso ante el apagado

Entrada[%]	Salida[°]	Entrada[%]	Salida[°]
78	45°	88	80°
78	45°	88	80°
79	45°	90	85°
80	45°	88	80°
82	55°	87	75°
83	60°	88	80°
83	60°	90	85°
84	64°	88	80°
85	68°	87	75°
86	71°	88	80°
87	75°	88	80°
88	80°	88	80°
90	85°	87	75°
88	80°	88	80°
87	75°	90	85°
88	80°	88	80°
88	80°	87	75°
90	85°	88	80°
88	80°	90	85°
87	75°	88	80°

Fuente: Propia

En la tabla 19 se puede observar la respuesta del controlador difuso a la entrada de nivel de líquido que presenta la planta, pero esta se encuentra acotada al llegar a un ángulo de giro de 85° ya que en ese instante está respondiendo el sensor de ángulo de giro el cual desactiva la bomba de agua para proteger el tanque de posibles rebalses, en todos los casos en mención esto ocurre al tener 90% de líquido, este valor de protección puede variarse según el requerimiento solicitado por parte del operario.

De igual manera se observa en la figura inferior la respuesta del sensor que apaga constantemente la bomba de agua e impide el ingreso de más líquido.

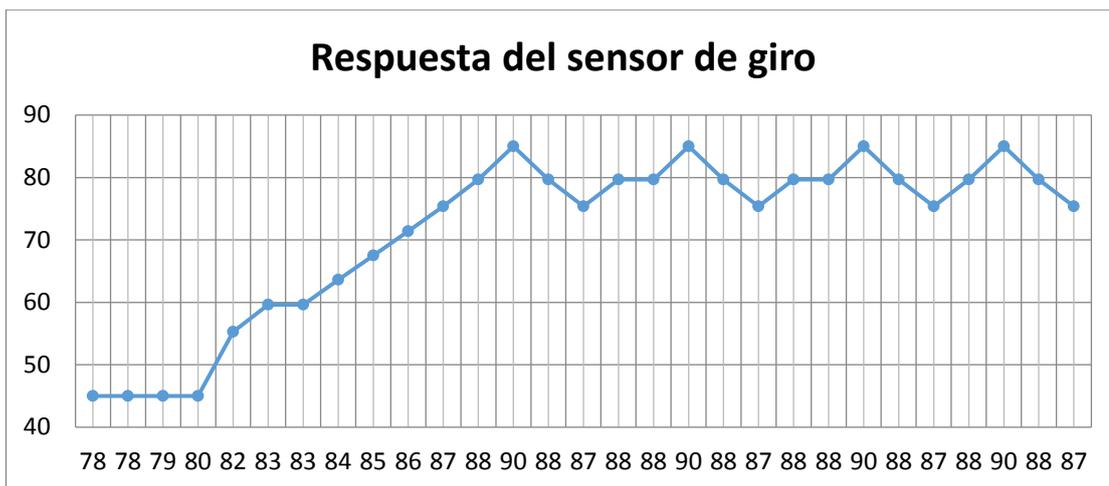


Figura 66: Respuesta del sensor de giro a diferentes mediciones porcentuales de líquido
Fuente: Propia

Si bien se tiene una respuesta adecuada para la protección del tanque, esto nos genera un cierto error de medida el cual medimos físicamente con una regla y se compara con el valor obtenido por el sensor, como se ve en la tabla 20.

Tabla 20: Datos obtenidos por el controlador vs. Datos obtenidos por medición con regla

N° de muestra	Llenado en %	Altura de llenado en cm.
1	90%	89.8
2	90%	90.3
3	91%	90.7
4	90%	90.2
5	90%	90.4
6	90%	89.5
7	91%	90.7
8	91%	91.4
9	91%	90.9

Fuente: Propia

Tabla 21: Promedio de muestras vs. Promedio del controlador

	Llenado en %	Altura de llenado en cm.
Promedio de muestras	90.45%	90.45
Promedio de controlador	90%	90

Fuente: Propia

4.2.4. Pruebas del controlador difuso (Fuzzy controller)

En las pruebas realizadas en la respuesta del controlador difuso con diferentes entradas se desarrolló una aplicación que permite observar la respuesta de esta en tiempo real y variando la entrada con lo cual se puede observar todos los escenarios posibles.

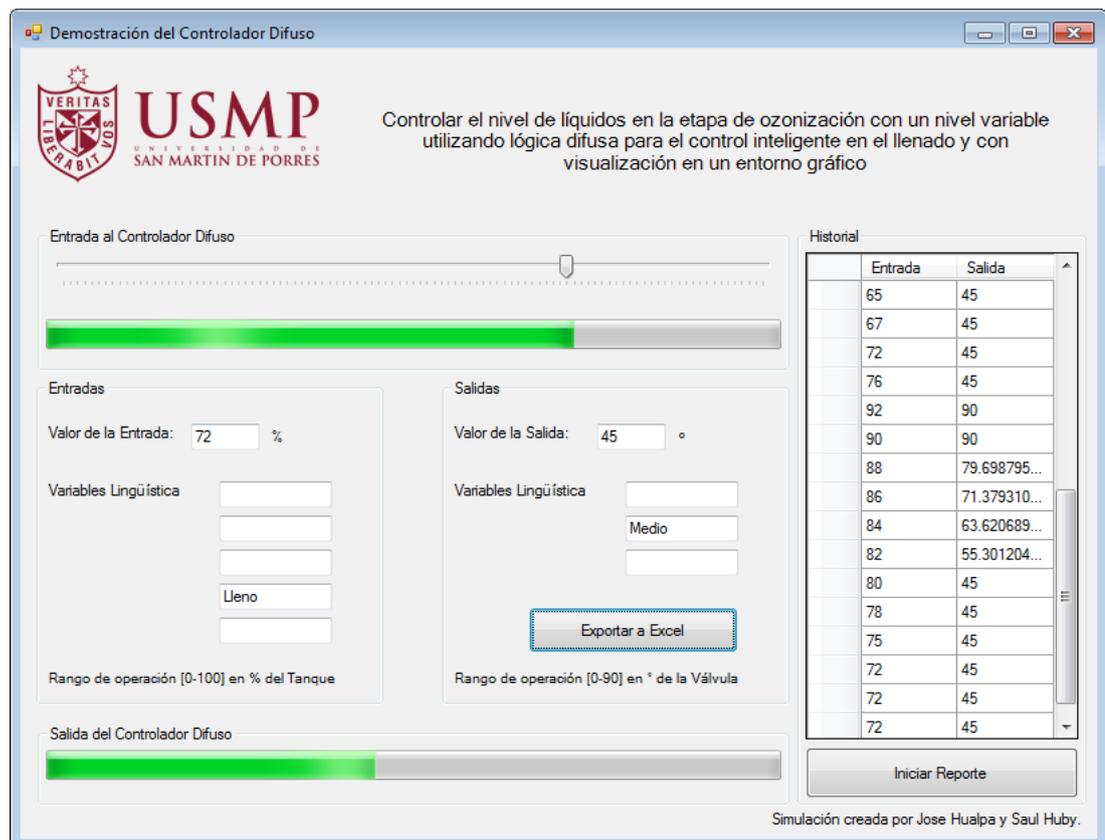


Figura 68: Pruebas a interfaz de operador
Fuente: Propia

Mientras se realiza la prueba para cada entrada, se pueda observar a que variable lingüística corresponde o cuales están interviniendo en el momento tanto en la entrada como en la salida, además esta información puede ser exportada a un archivo de Excel para luego poder ser manipulada.

A continuación se muestra en la tabla 23 las diferentes respuestas que tiene el sistema.

Tabla 23: Respuesta del controlador difuso

Entrada en %	Salida °	Entrada en %	Salida °
5	0	72	45
10	0	76	45
11	0	92	90
14	0	90	90
16	0	88	80
19	0	86	71
23	0	84	64
32	0	82	55
54	45	80	45
59	45	78	45
65	45	75	45
67	45	72	45

Fuente: Propia

En la tabla 23 se muestran algunos resultados de la respuesta del controlador, si bien al comprobar la respuesta para cada una de las entradas del controlador difuso, podemos observar que la respuesta es inmediata y en tiempo real, pero cabe recalcar que por software la respuesta es automática, con respecto al hardware, la servo válvula podría demorarse hasta 500ms ya que debe de recibir la posición angular en la cual debe de colocarse y existe un tiempo hasta poder llegar a esta posición ya que además de velocidad debe generar una fuerza para poder realizar el giro.

En el caso de tener un sobre flujo en el llenado del tanque se puede saber que el tiempo de respuesta va ser de 0.5 segundos, debido a que este es el tiempo que toma la servo válvula en ir de 0° a 90°, además a partir del 90% del fluido en el tanque de agua ya la servo válvula se cierra completamente y no permite el ingreso de líquido y nos da un margen del 10% de protección, entonces el sistema esta doblemente protegido ante cualquier sobre flujo en el tanque.

Cabe recalcar que se tiene diseñado un código de error que es el “517” que se utiliza cuando el sensor no funciona o tiene algún problema para lo que el operario deberá de considerar realizar un reemplazo o verificar el conexasión ya que podría estar existiendo algún error en la toma de medidas.

Se realizaron más pruebas al controlador difuso, pero esta vez se hizo cambios abruptos en el controlador, por ejemplo se varió la entrada, se ingresó 91% y se cambió abruptamente a 0%, la respuesta del controlador fue la esperada viendo los cambios exactos en la salida, esto simularía a una mala medición a un cambio abrupto en el flujo del líquido (ver tabla 24).

Se realizaron cambios abruptos en distintos instantes de tiempo y se observó que el sistema funcionaba ante cualquier cambio, entonces el controlador difuso realiza su función la cual es controlar una servo válvula.

Si se sigue observando la tabla 24, los cambios suaves o graduales son reconocidos por el controlador, esto significa que el controlador es estable y en la mayoría de mediciones la información es correcta, cabe resaltar que en esta prueba no se encontró ningún error de medición o error del controlador difuso.

Este tipo de comportamiento no se puede obtener con un controlador “PID”, que ante cambios abruptos el controlador demora varios segundos en estabilizarse, he aquí otra de las ventajas de usar un controlador difuso.

Estas mediciones fueron realizadas en un prototipo de tanque de aproximadamente 16 litros y una altura de 30 centímetros, no se pudo hacer pruebas en tanques reales ni en tanques puestos en procesos de fabricación, por lo que solo quedará como un ejercicio académico, donde se demuestra la robustez del controlador difuso ante otros tipos de controladores.

Tabla 24: Respuesta al controlador difuso con cambios abruptos

Entrada en %	Salida °	Entrada en %	Salida °	Entrada en %	Salida °	Entrada en %	Salida °
36	0	84	64	32	0	89	84
36	0	82	55	70	45	91	90
40	0	80	45	89	84	91	90
47	30	78	45	78	45	85	68
53	45	76	45	78	45	53	45
57	45	74	45	81	51	38	0
59	45	72	45	86	71	38	0
66	45	70	45	89	84	39	0
75	45	68	45	90	90	39	0
85	68	67	45	90	90	39	0
90	90	65	45	90	90	39	0
87	75	63	45	91	90	39	0
83	60	61	45	0	0	43	15
84	64	59	45	0	0	43	15
87	75	58	45	12	0	46	26
89	84	56	45	88	80	51	45
91	90	60	45	88	80	61	45
91	90	60	45	88	80	73	45
91	90	10	0	88	80	96	90
93	90	10	0	88	80	35	0
93	90	10	0	88	80	54	45
91	90	10	0	88	80	52	45
89	84	100	90	88	80	7	0
87	75	100	90	88	80	81	51

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- Primera:** Las mediciones del sensor ultrasónico introducen un error de 0.5 centímetros, para poder reducir este error se necesita cambiar a un sensor con un menor rango de error.
- Segunda:** Para poder emular una electroválvula regulable, se hizo un arreglo con una válvula y un servo motor, la cual se acomoda a las necesidades de una pequeña o media industria de embotellado.
- Tercera:** El controlador difuso mejora el proceso de llenado y medición de niveles de líquido, esto debido a que el error de nivel lo reduce de 5% (con un sensor de flota) a un 1%, esto nos deja un tiempo de respuesta de 0.5 segundos, lo que permite trabajar con mayor seguridad tanto para el operario como para la planta en sí, ya que el riesgo y la incertidumbre se están disminuyendo.
- Cuarta:** El entorno visual diseñado muestra los resultados del proceso de llenado del tanque prototipo y el tiempo de llenado que es de aproximadamente 1 minuto con 30 segundos, esto genera un control sobre el tiempo estimado de llenado de cualquier tanque en el que se coloque este sistema.
- Quinta:** Este tipo de sistemas da todas las ventajas del mundo digital tales como: supervisión a distancia, manejo de información digital, activación y desactivación de manera inteligente imitando al operario de los procesos de fabricación de productos.
- Sexta:** El controlador difuso realiza el proceso de llenado y cálculos en tiempo real, esto ayuda al operario a controlar el nivel de líquido en el tanque, además el

sistema propone la utilización de software y hardware para este controlador difuso.

Séptima: Las funciones de membresía son fundamentales para automatizar los procesos que tengan incertidumbre, ayudan a pronosticar por medio de sus variables lingüísticas y además obteniendo los datos del sensor, y saber en qué nivel está llenado el tanque y en qué momento empezar a actuar de una u otra manera, imitando siempre al experto humano de la industria, estas funciones de membresía son ideales al momento de automatizar algún proceso industrial que requieran algún control que dependa mucho de la experiencia del operador o que se necesiten reducir la incertidumbre.

Octava: El sistema de acondicionamiento de la electroválvula debe estar incluido, para el correcto funcionamiento del mismo, además se debe considerar siempre sistemas de protección y respaldo ante cualquier falla del sistema principal.

Novena: Con la llegada de la cuarta revolución industrial y la aplicación de sistemas expertos para el manejo de la industria, el controlador difuso diseñado se estaría alineando a la tendencia tecnológica de la industria.

RECOMENDACIONES

- Primera:** Se debe de utilizar una electroválvula proporcional para garantizar el correcto funcionamiento del controlador difuso.
- Segunda:** Al analizar el proceso de llenado se debe considerar otros líquidos que sean diferentes, en las pruebas realizadas solo se comprobó con agua, pero también podría trabajar con otros materiales como aceite, petróleo, jugos, entre otros, se debe considerar dos aspectos importantes, el primero que todo el sistema lo soporte y ello va desde las mangueras, sensores, tanque, válvulas entre otros y lo segundo son las normativas para el manejo de alimentos y/o bebidas ya que esto es de vital importancia para procesos que están relacionados con el consumo de alimentos.
- Tercera:** Si bien el controlador difuso diseñado para la etapa de ozonización responde a los requerimientos solicitados, se podrían variar algunos detalles tales como: el tipo de sensor, la experiencia del experto humano para tener un mejor desempeño del proceso además de enriquecer la base de conocimiento, con el fin de reducir la incertidumbre del proceso.
- Cuarta:** La tesis se orienta a plantas embotelladoras, pero depende mucho de la base de conocimiento, y si en el caso no fuera muy experta o no sería la adecuada se podría avanzar un paso más y quizás diseñar un controlador “Fuzzy Tuning PID” o quizás “Neuro - Fuzzy” donde el sistema ya aprendería y el proceso se optimizaría en cada proceso de llenado.
- Quinta:** El entorno del operario diseñado cumple con todos los requerimientos solicitados, pero se podrían agregar más

valores o características del sistema así como calcular valores como velocidad del flujo de entrada y/o salida, tiempos de llenado aproximados, niveles de producción entre otras cosas que puedan ayudar a mejorar el proceso productivo.

Sexta: Se podría hacer un modelamiento en 3d del tanque, para ello se podría utilizar herramientas de modelado como 3d Studio Max, Visual Studio y 3d Studio Max versión 2015. Estos programas pueden modelar cualquier tipo de sistemas como el presentado en esta tesis.

Séptima: Una aplicación útil en tiempo real a recomendar es Wonderware InTouch HMI. Esta es una aplicación SCADA que puede trabajar en tiempo real.

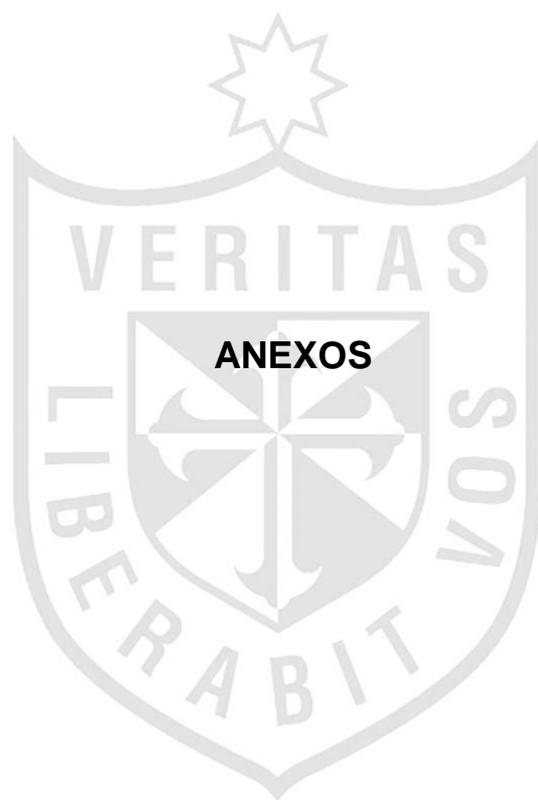
Octava: Para la adquisición de los datos al PC, se puede usar Ethernet, con este estándar de red se puede transmitir y recepcionar los datos a gran escala, esta es una de las grandes ventajas para enviar y recibir información a la tarjeta de adquisición de datos.

Novena: Cuando se selecciona el tipo o tamaño de bomba, se debe tener en cuenta que la bomba por si sola debe ser capaz de abastecer la demanda máxima dentro de los rangos de presiones y caudales, existiendo siempre una bomba adicional para alternancia con la (o las) otra (u otras) y cubrir entre todas, por lo menos el 150% de la demanda máxima probable. Además debe trabajar, por lo menos, contra una carga igual a la presión máxima del tanque

FUENTES DE INFORMACIÓN

- Alzate, D. (2010): *Control y medida de control de líquido con señales de ultrasonido*. Risaralda Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis para obtener el título de ingeniero.
- Arduino (2016): *Download Arduino 1.6.12*. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy and modeling for control*. New York: Academic Publishers
- Bonifacio, M. y Sanz, A. (2001): *Redes neuronales y sistemas difusos*. 2da Edición. Madrid: RA – MA.
- Corona M. y Zavala L. (2010): *Análisis y Sistema de Señales*. Recuperado de <http://pacific.fi-p.unam.mx/cursos/sensor%20ultra/sensor.html>
- Corripio, A. y Smith, C. (1991): *Control Automático de procesos*. 1^{ra} edición. México: Noriega Limusa
- Ogata, K. (1998): *Ingeniería de control moderna*. 3^{era} Edición. USA: Person - Princen Hall.
- De los Ríos, C. (2004): *Evaluación de estructuras y métodos de ajuste de reguladores PID – difusos*. Piura, Perú: Universidad de Piura. Tesis para obtener el título de ingeniero.
- Labcenter Electronics Ltd (2016): *Proteus Design Suite 8.5*. Recuperado de <https://www.labcenter.com/>
- Laborda R. y Recalde L. (2012): *Manual de seguridad para operaciones en actividades electrónicas*. Recuperado de <http://www.sprl.upv.es/mselectronica1.htm#p2>

- Microchip (2003): *Data Sheet Pic*. Recuperado de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>
- Microsoft (2016): *Biblioteca de clases de .NET Framework*. Recuperado de [https://msdn.microsoft.com/es-es/eses/library/ms229335\(v=VS.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/eses/library/ms229335(v=VS.90).aspx)
- Microsoft (2016): *Download Visual Studio*. Recuperado de <https://msdn.microsoft.com/es-es/vstudio/default.aspx>
- Microsoft (2016): *Información general sobre gráficos 3D*. Recuperado de <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/ms747437.aspx#lights>
- Pallas, R. (2003): *Sensores y acondicionamiento de señal 4^a Edición*. Sevilla: Marcombo S.A.
- Ramirez, O. (2005): *Lógica difusa*. México: Universidad de las Américas Puebla
- Tejada, G. (2000): *Tutorial de lógica difusa*. Lima, Perú: UNMSM. Recuperado de <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata>
- Trillas, E. y Gutiérrez, J. (1992). *Aplicaciones de la lógica borrosa*. Madrid: CSIC - CSIC Press
- Viejo, M. y Álvarez, J. (2005): *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones 3^{ra} Edición*. México: Limusa Noriega Editores
- Ying, H. (2000): *Fuzzy Control and modeling: Analytical foundations and Applications*. New York: IEEE
- Zadeh, A. (1996): *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems*. New York: World Scientific.



ANEXO N° 1

DATA SHEET DEL MICRO CONTROLADOR ATMEGA 328

Features

- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
 - 256/512/512/1K Bytes EEPROM
 - 512/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
 - Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
 - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
 - 0 - 4 MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1 MHz, 1.8V, 25°C
 - Active Mode: 0.2 mA
 - Power-down Mode: 0.1 µA
 - Power-save Mode: 0.75 µA (Including 32 kHz RTC)



8-bit **AVR**[®]
Microcontroller
with 4/8/16/32K
Bytes In-System
Programmable
Flash

ATmega48A
ATmega48PA
ATmega88A
ATmega88PA
ATmega168A
ATmega168PA
ATmega328
ATmega328P

Summary

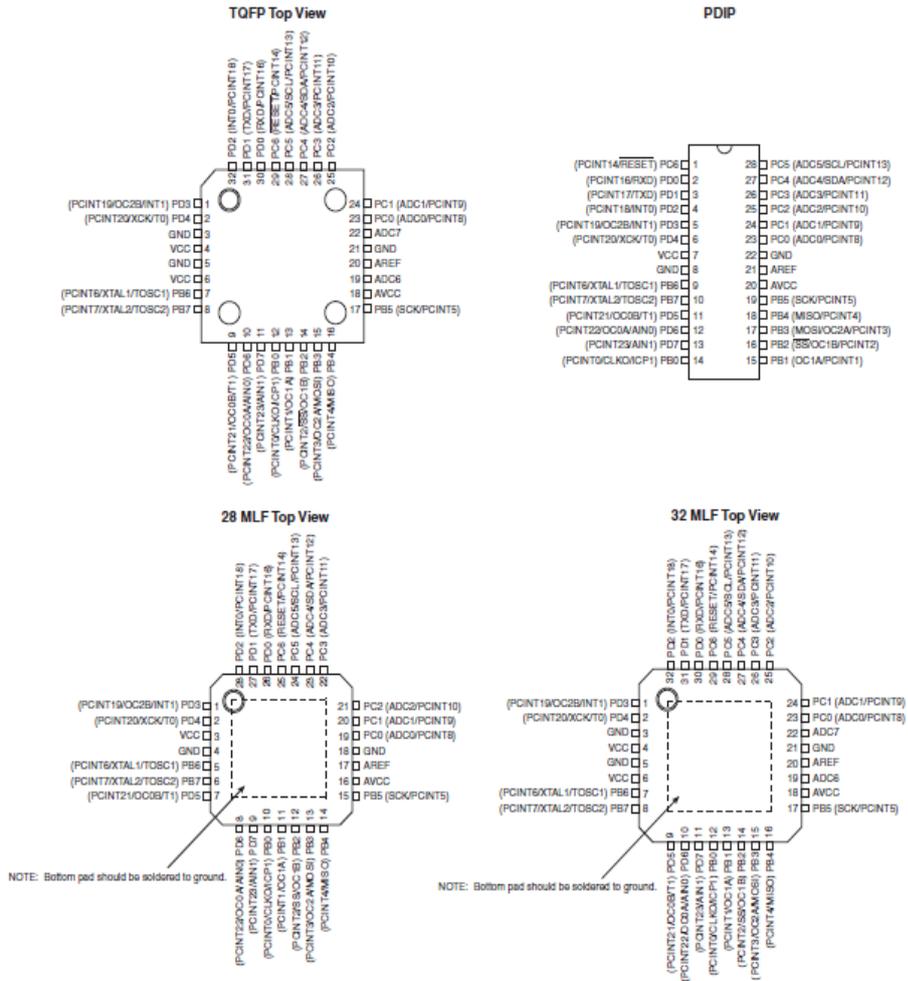
Rev. 8271BS-AVR-04/10



ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P

1. Pin Configurations

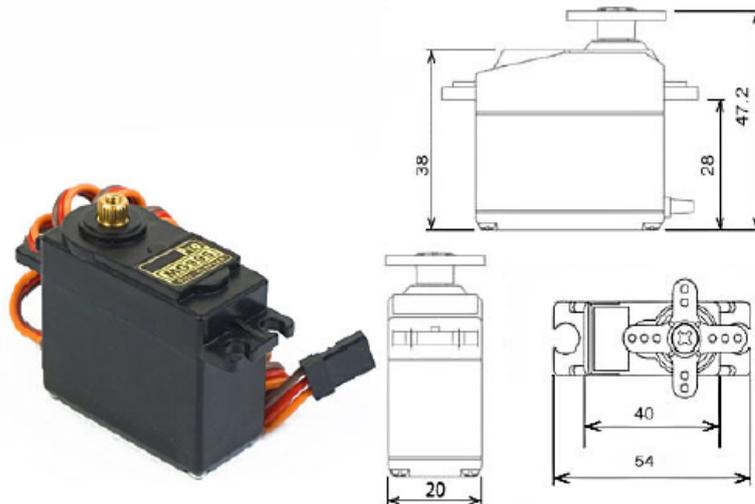
Figure 1-1. Pinout ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P



ANEXO N° 2

DATA SHEET SERVOMOTOR MG995

MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo



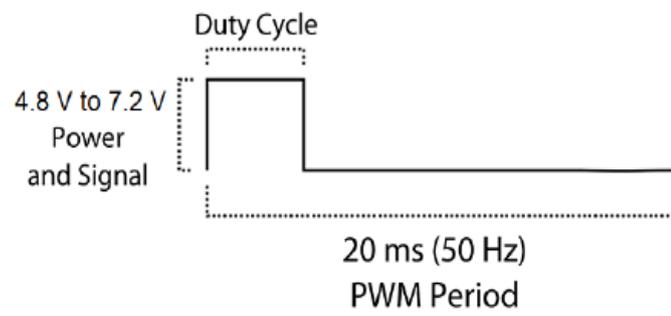
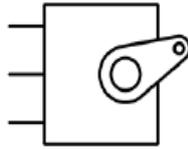
The unit comes complete with 30cm wire and 3 pin 'S' type female header connector that fits most receivers, including Futaba, JR, GWS, Cirrus, Blue Bird, Blue Arrow, Corona, Berg, Spektrum and Hitec.

This high-speed standard servo can rotate approximately 120 degrees (60 in each direction). You can use any servo code, hardware or library to control these servos, so it's great for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. The MG995 Metal Gear Servo also comes with a selection of arms and hardware to get you set up nice and fast!

Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 8.5 kgf-cm (4.8 V), 10 kgf-cm (6 V)
- Operating speed: 0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Dead band width: 5 μ s
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

PWM=Orange (\square)
Vcc = Red (+)
Ground=Brown (-)



ANEXO N° 3

CARACTERÍSTICAS DE SOLENOIDE (ELECTROVÁLVULA)

**Bobinas
Capsuladas**

**Características
Principales.**



Tipo de corriente Hz	Conexión - DIN 43650 IP65 Conjunto de bobina y carcasa integradas a prueba de intemperie y humedad. Conexión Plug-in con prensacable o roscada para conducto de 1/2" NPT.			NEMA 4x. Conjunto de bobina y carcasa integradas a prueba de intemperie, agua y corrosión salina.		IEC 79-18 m. Conjunto de bobina y carcasa integradas a prueba de explosión, intemperie y corrosión salina.	
	Tamaño G	Tamaño M		Tamaño M		Tamaño M	
	Forma B	Forma A		1/2"NPT Conexión		1/2"NPT Conexión	
	Clase F 155 °C	Clase F 155 °C	Clase H 180 °C	Clase F 155 °C	Clase H 180 °C	Clase F 155 °C	Clase H 180 °C
CC	GF06C	MF19C	MH19C	MF19Y	MH19Y	MF19Z	MH19Z
CA 50 Hz	GF06C	MF11C	MH11C	MF11Y	MH11Y	MF11Z	MH11Z
		MF16C	MH16C	MF16Y	MH16Y	MF16Z	MH16Z
		MF20C	MH20C	MF20Y	MH20Y	MF20Z	MH20Z
CA 60 Hz	GF06C	MF13C	MH13C	MF13Y	MH13Y	MF13Z	MH13Z
		MF16C	MH16C	MF16Y	MH16Y	MF16Z	MH16Z
		MF20C	MH20C	MF20Y	MH20Y	MF20Z	MH20Z

* Forma B corresponde a conexiones DIN 43650 forma B - * Forma A corresponde a conexiones DIN 43650 forma A

Tensiones disponibles

Volts	12	24	48	110	120	220	240
CC	Si	Si	Si	Si	No	Si	No
50 Hz	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
60 Hz	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tipo de conectores para conexión DIN

Prensacable Pg9			Prensacable Pg11			Conexión 1/2"NPT		
Común	Junta luminosa	Conector luminoso	Común	Junta luminosa	Conector luminoso	Común	Junta luminosa	Conector luminoso
1	4	7	2	5	8	3	6	9

Clave para la formación del número de catálogo de las bobinas capsuladas

M	F	11	Y	220	50	1
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)

Clase Térmica:

Clase F hasta 155 °C

Clase H hasta 180 °C

(1, 2, 3 y 4) Ver cuadro de bobinas capsuladas disponibles

1-Tamaño; 2- Clase térmica; 3- Potencia en Watts

4-Tipo de bobina:

-C conexión DIN

-Y conexión roscada con 3 cables de salida (uno de masa)

-Z a prueba de explosión conexión roscada con 3

cables de salida (uno de masa).

(5 y 6) Ver cuadro de tensiones disponibles

5- Tensión;

6- Tipo de corriente

(7) Tipo de conectores (únicamente para conexión DIN.

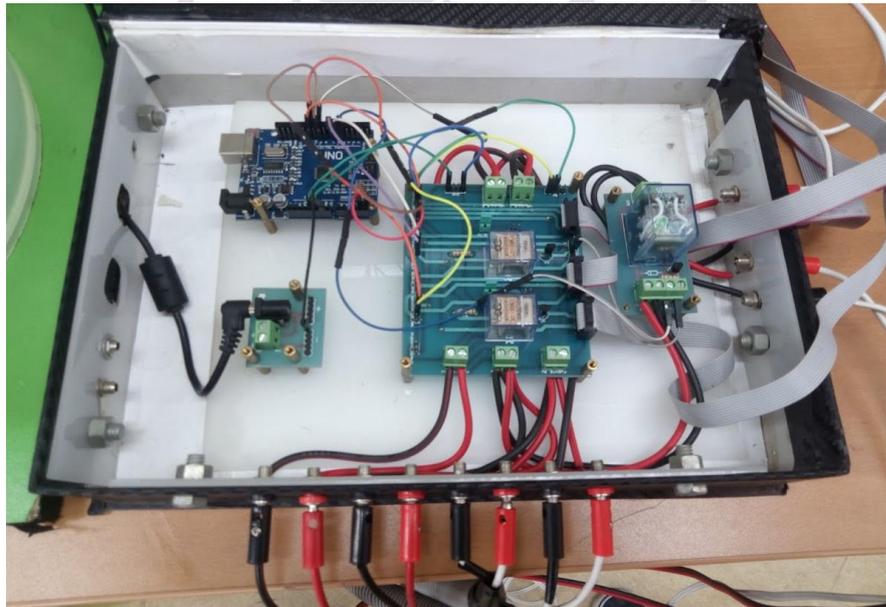
(ver cuadro)

ANEXO N° 4

IMÁGENES DE PROTOTIPO DE PLANTA SIMULADA



Planta simulada
Fuente: Propia



Circuito de acondicionamiento de control para electroválvulas y microcontrolador
Fuente: Propia



Electroválvulas de apertura y cierre
Fuente: Propia



Tanque de simulación de proyecto
Fuente: Propia



Bomba de agua que llena tanque
Fuente: Propia



Sensores ultrasónicos acoplados a tapa de tanque prototipo
Fuente: Propia