



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO.**

AUTORES: JOSÉ CARLOS GARCÉS PICO
JUAN PABLO LEÓN CALDERÓN

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE
NIVEL, CONTROLADA MEDIANTE REDES NEURONALES Y
LÓGICA DIFUSA, DESTINADA AL LABORATORIO DE
CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS
FUERZAS ARMADAS ESPE.**

DIRECTOR: ING. FABRICIO PÉREZ

CODIRECTOR: ING. FREDDY SALAZAR

LATACUNGA

2015

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE CARRERA DE
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICADO**

**ING. FABRICIO PÉREZ (DIRECTOR)
ING. FREDDY SALAZAR (CODIRECTOR)**

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE NIVEL, CONTROLADA MEDIANTE REDES NEURONALES Y LÓGICA DIFUSA, DESTINADA AL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**”, realizado por los señores GARCÉS PICO JOSÉ CARLOS, LEÓN CALDERÓN JUAN PABLO han sido guiados y revisados periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, en el Reglamento de Estudiantes.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, si recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat: Autorizan a los señores: GARCÉS PICO JOSÉ CARLOS, LEÓN CALDERÓN JUAN PABLO, que lo entreguen a la ING. KATYA TORRES, en su calidad de Directora de Carrera.

Latacunga, Mayo del 2015.

Ing. Fabricio Pérez
DIRECTOR

Ing. Freddy Salazar.
CO-DIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros:

JOSÉ CARLOS, GARCÉS PICO
JUAN PABLO, LEÓN CALDERÓN

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE NIVEL, CONTROLADA MEDIANTE REDES NEURONALES Y LÓGICA DIFUSA, DESTINADA AL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”**., ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga Mayo del 2015.

José Carlos Garcés P.
C.C: 180366480-2

Juan Pablo León C.
C.C:1804459897

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros:

JOSÉ CARLOS, GARCÉS PICO
JUAN PABLO, LEÓN CALDERÓN

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE NIVEL, CONTROLADA MEDIANTE REDES NEURONALES Y LÓGICA DIFUSA, DESTINADA AL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE ”.**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Mayo del 2015.

José Carlos Garcés P.
C.C: 180366480-2

Juan Pablo León C.
C.C: 1804459897

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi madre, hermana y a toda mi familia que creyeron siempre en mí y me apoyaron con todo su amor y consejos.

A mi Madre, porque con su sacrificio diario y ejemplo de lucha ha logrado que yo sea un profesional.

A mi hermana que ha sido siempre mi mayor ejemplo de trabajo, dedicación y honestidad.

A mi enamorada por ser mi apoyo en todo momento. Que éste proyecto represente en ti todo el sacrificio que yo he puesto y sea una inspiración y ejemplo para la culminación de su carrera profesional.

Juan León

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios y a mi familia, sin dejar a un lado a todas aquellas personas que depositaron su confianza en mí, por el apoyo incondicional que me brindaron durante cada escalón de mi vida, y con el cual he podido culminar mi carrera profesional.

José C. Garcés

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento va dirigido principalmente a Dios, ya que gracias a sus bendiciones y su iluminación nos permitió culminar nuestra carrera universitaria.

También agradecemos a esta prestigiosa institución, Universidad de las Fuerzas Armadas Espe y a nuestros profesores de la carrera por compartir sus conocimientos; en especial a nuestros tutores del proyecto, Ing. Fabricio Pérez e Ing. Freddy Salazar por brindarnos su amistad, comprensión, experiencia y

apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

Y no podemos dejar de agradecer a nuestros padres que con su amor han sido las bases fundamentales a lo largo de nuestras vidas.

José C. Garcés Y Juan P. León

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiv
RESUMEN	xxv
ABSTRACT	xxvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia	2
1.3. Alcance del proyecto	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. General	3
1.4.2. Específicos.....	3
1.5. Descripción general del proyecto	4
CAPÍTULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Sistemas de control.....	5
2.1.1. Introducción.....	5
2.1.2 Estructura de un sistema de control.....	5
2.1.3. Características de un sistema de control	6
2.1.4. Tipos de sistemas de control.....	7
2.2. Control inteligente	8

2.3.	Fundamentos de la lógica Fuzzy.....	9
2.3.1.	Conjuntos no difusos y difusos.....	9
2.3.2	Tipos de Funciones de Pertenencia.....	10
2.3.3	Operaciones entre Conjuntos Difusos.....	12
2.4.	Control Fuzzy.....	14
2.4.1.	Características del Control Difuso.....	14
2.4.2.	Diseño de controladores difusos.....	15
2.4.3.	Fuzzificación.....	16
2.4.4.	Implicación o inferencia.....	17
2.4.5.	Defuzzificación.....	18
2.4.6.	Ventajas y desventajas del control difuso.....	19
2.4.7.	Aplicación de un control difuso “péndulo invertido”.....	20
2.5.	Redes neuronales artificiales (R.N.A.).....	28
2.5.1.	Introducción.....	28
2.5.2.	Entradas y salidas.....	32
2.5.3.	Pesos sinápticos.....	33
2.5.4.	Regla de propagación.....	33
2.5.5.	Funciones de activación.....	34
2.5.6.	Arquitectura de Redes Neuronales Artificiales.....	38
2.5.7.	Aprendizaje.....	42
2.5.8.	Fase de entrenamiento.....	42
2.5.9.	Fase de operación.....	43
2.5.10.	Redes neuronales con conexión hacia delante.....	43
2.6.	Aplicaciones actuales de las redes neuronales artificiales.....	47
2.7.	Tarjeta de Adquisición de datos Mydaq.....	50
2.7.1.	Características de las Entradas y Salidas.....	50
2.8.	Labview 2014.....	53
2.8.1.	Funcionamiento del Software.....	54
2.8.2.	Panel frontal.....	54
2.8.3.	Diagrama de bloques.....	55
2.8.4.	Paletas.....	57
2.8.5.	Paleta de Controles.....	57

2.8.6.	Paleta de Funciones	58
2.8.7.	Paleta de Herramientas	58
2.8.8.	Programación en LabVIEW.....	59
2.8.9.	Creando un VI.....	60
2.9.	Ejecución de un VI	60
2.9.1	Estructuras	61
2.9.2.	Aplicación de LabVIEW en sistemas de adquisición de datos	62
2.10.	Matlab	63
2.10.1.	Simulink	65
2.11.	Sistema de bombeo	66
2.11.1.	Bombas de agua	66
2.11.2.	Tipos de bombas.....	67
2.11.3.	Selección de bombas hidráulica.....	71
2.11.4.	Factores que intervienen en la en la eficiencia de una bomba	74
2.11.5.	Sistema con elevación estática de succión.....	75
2.11.6	Ecuaciones Fundamentales.....	77
2.12.	Sensor.....	81
2.12.1	Tipos de sensores.....	82
2.13.	Tuberías y accesorios	83
2.14.	Accesorios.....	84
2.15.	Válvulas	89
2.15.1.	Tipos de Válvulas:.....	90
2.16.	Variadores de velocidad.....	93
2.16.1.	Composición de un variador de velocidad	93
2.18.2.	Características generales de un variador de velocidad.....	95
2.18.3.	Tipos de control de velocidad.....	96
2.18.4.	Aplicaciones	96
2.18.5.	Protecciones del variador de velocidad.....	98

CAPÍTULO III.....	99
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO.....	99
3.1. Modelamiento.....	100
3.1.1. Modelo de Depósito Simple	100
3.2. Diseño mecánico.....	103
3.2.1. Estructura de apoyo metálica.....	103
3.2.2. Estructura de madera.....	107
3.2.3. Cuba de recepción	110
3.3. Selección de elementos constitutivos	116
3.3.1. Selección de la bomba.....	116
3.3.2. Tuberías y Accesorios.....	118
3.3.3. Ruedas Móviles con Seguro	126
3.4. Selección de equipos de control	127
3.4.1. Selección de la Tarjeta NI MyDAQ.....	127
3.4.2. Selección del Sensor Ultrasónico.....	128
3.5. Selección de aparatos de maniobra.....	129
3.5.1. Elementos de Maniobra	129
3.6. Diseño eléctrico.....	131
3.6.1. Diagrama de control.....	131
3.6.2. Diagrama de fuerza.....	131
3.6.3. Protecciones eléctricas	131
3.6.4. Coordinación de protecciones.....	132
3.6.5. Selección de elementos de protección.....	133
3.6.6. Selección de los fusibles.....	134
3.6.8. Selección del guardamotor.....	136
3.6.9. Selección del contactor	137
3.7 Selección de la fuente de alimentación.....	138
3.7.1. Selección de conductores	139
3.7.2. Selección de canaletas	141
3.7.3 Selección de canaletas ranuradas y rieles.....	142
3.7.4. Panel operador de mando.....	144

3.8.	Diseño de la interfaz gráfica con LabVIEW	149
3.8.1.	Adquisición y comunicación	149
3.8.2.	Sistema de control de nivel	151
3.8.4	Diseño del software para la adquisición de datos	155
3.8.5.	Programación del Control Difuso en LabView 14.0.....	160
3.8.6.	Programación del Panel Frontal de Control.	169
3.8.7.	Herramientas del Control Difuso	170
3.8.8.	Programación del Control Neuronal	172
3.8.9.	Implementacion de la Red Neuronal	174
3.8.10.	Entrenamiento de la red.....	176
3.8.11.	Validación de resultados	177
3.8.12.	Generación de la red neuronal en simulink.....	178
3.8.13.	Validación de resultados de la red neuronal en simulink	179
3.8.14.	Simulación del proceso de nivel con la red neuronal	180
CAPÍTULO IV		182
4.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	182
4.1.	Análisis de resultados de la simulación de las curvas del control difuso y neuronal en matlab.	182
4.2.	Análisis de resultados de la simulación de las curvas del control difuso y neuronal en labview	197
4.3.	Análisis de resultados simulación vs parte experimental	210
4.4	Análisis de Costos.....	211
4.4.1.	Gastos indirectos:	211
4.4.2.	Costo total del proyecto:	212
CAPÍTULO V		213
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	213
5.1.	Conclusiones.....	213
5.2.	Recomendaciones	215
BIBLIOGRAFÍA.....		217

NETGRAFÍA	218
ANEXOS	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1.	Estructura de un Sistema de Control.....	6
Figura 2. 2.	Sistema de Control en Lazo Abierto	7
Figura 2. 3.	Sistema de Control en Lazo Cerrado	8
Figura 2. 4.	Función de Pertenencia Unitaria o Singleton.....	11
Figura 2. 5.	Función de Pertenencia.....	11
Figura 2. 6.	Conjunto Difuso A.....	12
Figura 2. 7.	Conjunto difuso B	13
Figura 2. 8.	Unión entre A y B	13
Figura 2. 9.	Unión entre A y B	13
Figura 2. 10.	Intersección entre A y B.....	14
Figura 2. 11.	Complemento de A.....	14
Figura 2. 12.	Esquema de un control difuso	16
Figura 2. 13.	Funciones de pertenencia de la velocidad del andén.....	21
Figura 2. 14.	Funciones de pertenencia del ángulo entre la plataforma y la pértiga	21
Figura 2. 15.	Funciones de pertenencia de la velocidad angular del ángulo entre la plataforma y la pértiga.....	21
Figura 2. 16.	Valor actual para un ángulo.....	23
Figura 2. 17.	Valor actual para la velocidad angular.....	24
Figura 2. 18.	Grado de pertenencia del valor actual del ángulo con respecto a la variable lingüística ángulo	24
Figura 2. 19.	Grado de pertenencia del valor actual de la velocidad angular con respecto a la variable lingüística velocidad angular.	25
Figura 2. 20.	Cálculo del mínimo de las dos partes de la condición de la regla.....	25
Figura 2. 21.	Resultado de la velocidad si el ángulo es cero y la velocidad angular es negativa baja	26
Figura 2. 22.	Resultado de la velocidad si el ángulo es positivo bajo y la velocidad angular es cero	26

Figura 2. 23.	Resultado de la velocidad si el ángulo es positivo y la velocidad angular es negativa baja.....	27
Figura 2. 24.	Resultado de las cuatro reglas solapadas.....	27
Figura 2. 25.	Valor final de la velocidad usando el centro de gravedad.....	28
Figura 2. 26.	Modelo de una neurona biológica.....	31
Figura 2. 27.	Modelo de una neurona artificial.....	32
Figura 2. 28.	Función escalón de conexión y desconexión.	34
Figura 2. 29.	Función saturación lineal.....	35
Figura 2. 30.	Función sigmoideal asimétrica.....	36
Figura 2. 31.	Función sigmoideal simétrica.....	36
Figura 2. 32.	Función lineal.....	37
Figura 2. 33.	Red Neuronal Monocapa.....	38
Figura 2. 34.	Red Neuronal Multicapa.....	39
Figura 2. 35.	Red Neuronal Multicapa.....	39
Figura 2. 36.	Red neuronal de Hopfield.....	40
Figura 2. 37.	Red neuronal de Hopfield.....	41
Figura 2. 38.	Red neuronal de Hopfield.....	42
Figura 2. 39.	NI myDAQ.....	52
Figura 2. 40.	Panel frontal.....	55
Figura 2. 41.	Interfaz gráfica del diagrama de bloques.....	56
Figura 2. 42.	Tools palette.....	57
Figura 2. 43.	Paleta de controles - Express.....	57
Figura 2. 44.	Paleta de funciones.....	58
Figura 2. 45.	Paleta de herramientas.....	59
Figura 2. 46.	Barra de herramientas.....	61
Figura 2. 47.	Estructuras.....	62
Figura 2. 48.	Ventana inicial de Matlab.....	65
Figura 2. 49.	Ventana inicial del Simulink.....	66
Figura 2. 50.	Bomba centrífuga.....	67
Figura 2. 51.	Bomba alternativa de potencia.....	69
Figura 2. 52.	Bomba de Diafragma.....	70

Figura 2. 53.	Elevación Estática de Succión.....	76
Figura 2. 54.	Codo Estándar de 45°	85
Figura 2. 55.	Codo Estándar de 90°	86
Figura 2. 56.	Te Normal.....	87
Figura 2. 57.	Reducción.....	88
Figura 2. 58.	Ejemplo de Válvula	90
Figura 2. 59.	Válvula de Compuerta	91
Figura 2. 60.	Válvula de Mariposa	91
Figura 2. 61.	Válvula Tipo Bola.....	92
Figura 2. 62.	Válvula de Seguridad	93
Figura 2. 63.	Componentes de potencia para la etapa de control	94
Figura 2. 64.	Esquema de principio de un convertidor de frecuencia	95
Figura 3. 1.	Sistema de Entrenamiento	100
Figura 3. 2.	Sistema de Nivel con un solo Tanque	101
Figura 3. 3.	Estructura Metálica del Sistema.	105
Figura 3. 4.	Vista Frontal Estructura Metálica.....	106
Figura 3. 5.	Vista Lateral Izquierda Estructura Metálica.	106
Figura 3. 6.	Apoyo de Madera (MDF)	107
Figura 3. 7.	Diagrama de fuerzas momento en la estructura de madera	109
Figura 3. 8.	Depósito de fluido.....	110
Figura 3. 9.	(Tanque 1) principal.....	111
Figura 3. 10.	Propiedades del agua.....	113
Figura 3. 11.	Especificaciones técnicas del acrílico de 3mm.....	114
Figura 3. 12.	Tanque de Reserva (Tanque2).....	115
Figura 3. 13.	Bomba Centrífuga	117
Figura 3. 14.	Tuberías y accesorios de PVC	118
Figura 3. 15.	Válvula de Bola.....	119
Figura 3. 16.	Válvula Check.....	120
Figura 3. 17.	Rugosidad del plástico.....	122
Figura 3. 18.	Coeficiente de fricción para la entrada de proyección hacia adentro	124

Figura 3. 19.	Rugosidad del plástico.....	126
Figura 3. 20.	NI MyDAQ y su conexión al PC.....	128
Figura 3. 21.	Sensor HRXL- MAXSONAR-WRM (MB7369)	129
Figura 3. 22.	Variador de Frecuencia DELTA de la Serie VFD007E23A.....	130
Figura 3. 23.	Alternativas de asociación de equipos de protección.	133
Figura 3. 24.	Fusible y porta fusible marca CAMSCO	135
Figura 3. 25.	Interruptor Magneto-térmico CHINT	136
Figura 3. 26.	Guardamotor EATON	137
Figura 3. 27.	Contactador CHINT	138
Figura 3. 28.	Fuente de alimentación QUASAD	139
Figura 3. 29.	Canaletas lisas DEXON.....	141
Figura 3. 30.	Dimensiones canaletas lisas	142
Figura 3. 31.	Canaleta ranurada gris DEXON	143
Figura 3. 32.	Características de las canaletas ranuradas DEXON	143
Figura 3. 33.	Riel DIN simétrica	144
Figura 3. 34.	Características de las rieles DIN simétricas	144
Figura 3. 35.	Pulsadores CAMSCO, izquierda (marcha), derecha (paro)	144
Figura 3. 36.	Interruptor de emergencia tipo pulsar-girar para desenclavar	145
Figura 3. 37.	Luces Indicadoras marca Camsco	145
Figura 3. 38.	Tablero de Protección.....	146
Figura 3. 39.	Conexión eléctrica del tablero de protección.	147
Figura 3. 40.	Elementos montados en el tablero de protección.....	148
Figura 3. 41.	Tablero de control finalizado.....	149
Figura 3. 42.	Medio de conexión USB	150
Figura 3. 43.	Cable de Instrumentación.....	151
Figura 3. 44.	Diagrama Esquemático del Sistema de Control de Nivel.....	153
Figura 3. 45.	Diagrama Esquemático del Acondicionamiento de la Señal.....	153

Figura 3. 46.	Circuito de Simulación del Amplificador y Transmisor.....	154
Figura 3. 47.	Diseño de la placa Amplificador-Transmisor	155
Figura 3. 48.	Visualización de las pistas Amplificador-Transmisor en 3D.....	155
Figura 3. 49.	Visualización de la placa Amplificador-Transmisor en 3D.....	155
Figura 3. 50.	Crear un proyecto.....	156
Figura 3. 51.	VI Nuevo.....	157
Figura 3. 52.	Estructura While Loop	157
Figura 3. 53.	Crear una Constante	158
Figura 3. 54.	Escalamiento de la señal.....	158
Figura 3. 55.	Adquisición de la DAQ.....	159
Figura 3. 56.	Configuración de la DAQ Assistat	160
Figura 3. 57.	Configuración de los puertos de entrada.....	160
Figura 3. 58.	Indicador numérico	160
Figura 3. 59.	Fuzzy Systems Designer	161
Figura 3. 60.	Variables de entrada	162
Figura 3. 61.	Funciones de membresía	163
Figura 3. 62.	Variable de salida	163
Figura 3. 63.	Reglas de inferencia.....	164
Figura 3. 64.	Método de defusificación	165
Figura 3. 65.	Test systems	165
Figura 3. 66.	Archivo (*.fs).....	165
Figura 3. 67.	File path.....	166
Figura 3. 68.	Diagrama de bloques	167
Figura 3. 69.	Programa puesto en marcha	168
Figura 3. 70.	Estabilidad de la señal.....	168
Figura 3. 71.	Código completo de la interfaz Labview 14.0	169
Figura 3. 72.	Load Fuzzy System	170
Figura 3. 73.	Fuzzy Controller	170
Figura 3. 74.	Gráfica Nivel vs Voltios.....	173

Figura 3. 75.	Código de Entrenamiento	174
Figura 3. 76.	Topología de la Red Neuronal.....	175
Figura 3. 77.	Neuronal Network Training	176
Figura 3. 78.	Entrenamiento de la Red Neuronal	177
Figura 3. 79.	Comparación de curvas experimental y simulada	178
Figura 3. 80,	Representación gráfica de la red neuronal.....	178
Figura 3. 81.	Gráfica de la entrada con respecto a la salida.....	179
Figura 3. 82.	Diagrama del proceso de la planta de nivel.....	180
Figura 3. 83.	Gráfica del proceso de la planta de nivel Ej. Para 5 litros.....	181
Figura 4. 1.	Diagrama Fuzzy de la planta de nivel para 4litros.	183
Figura 4. 2.	Respuesta del Control Fuzzy para 4 litros.....	183
Figura 4. 3.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 4litros.	183
Figura 4. 4.	Respuesta del Control Neuronal para 4 litros.....	184
Figura 4. 5.	Diagrama Fuzzy de la planta de nivel para 5 litros.	185
Figura 4. 6.	Respuesta del Control Fuzzy para 5 litros.....	185
Figura 4. 7.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 5 litros.	186
Figura 4. 8.	Respuesta de la Red Neuronal para 5 litros.....	186
Figura 4. 9.	Respuesta del Control Fuzzy para 6 litros.....	187
Figura 4. 10.	Respuesta del Control Fuzzy para 6 litros.....	187
Figura 4. 11.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 6 litros.	188
Figura 4. 12.	Respuesta de la Red Neuronal para 6 litros.....	188
Figura 4. 13.	Respuesta del Control Fuzzy para 7 litros.....	189
Figura 4. 14.	Respuesta del Control Fuzzy para 7 litros.....	189
Figura 4. 15.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 7 litros.	190
Figura 4. 16.	Respuesta de la Red Neuronal para 7 litros.....	190
Figura 4. 17.	Respuesta del Control Fuzzy para 8 litros.....	191
Figura 4. 18.	Respuesta del Control Fuzzy para 8 litros.....	191
Figura 4. 19.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 8 litros.	192
Figura 4. 20.	Respuesta de la Red Neuronal para 8 litros.....	192
Figura 4. 21.	Respuesta del Control Fuzzy para 9 litros.....	193
Figura 4. 22.	Respuesta del Control Fuzzy para 9 litros.....	193

Figura 4. 23.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel set point 9 litros.....	194
Figura 4. 24.	Respuesta de la Red Neuronal para 9 litros.....	194
Figura 4. 25.	Respuesta del Control Fuzzy para 10 litros.....	195
Figura 4. 26.	Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 10 litros.....	196
Figura 4. 27.	Respuesta de la Red Neuronal para 10 litros.....	196
Figura 4. 28.	Respuesta de la Red Neuronal para 4 litros.....	198
Figura 4. 29.	Respuesta de la Red Neuronal para 5 litros.....	199
Figura 4. 30.	Respuesta de la Red Neuronal para 6 litros.....	201
Figura 4. 31.	Respuesta de la Red Neuronal para 7 litros.....	202
Figura 4. 32.	Respuesta de la Red Neuronal para 8 litros.....	204
Figura 4. 33.	Respuesta de la Red Neuronal para 9 litros.....	206
Figura 4. 34.	Respuesta de la Red Neuronal para 10 litros.....	208

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Reglas velocidad en funcion del ángulo entre la plataforma y pértiga y la velocidad angular entre la plataforma y la pértiga	23
Tabla 2. 2	Funciones de activación	37
Tabla 2. 3	Señales de los terminales de NI myDAQ [12].....	53
Tabla 3. 1	Lista de pesos de los elementos que posaran en la estructura.....	104
Tabla 3. 2	Datos de placa de la bomba	118
Tabla 3. 3	Fusibles para el circuito de potencia	134
Tabla 3. 4	Características del interruptor magneto-térmico.....	135
Tabla 3. 5	Características del guardamotor.....	136
Tabla 3. 6	Datos de placa del motor de la bomba	137
Tabla 3. 7	Características del contactor	138
Tabla 3. 8	Elementos del tablero de protección	147
Tabla 3. 9	Datos de las variables (Entrada y Salida).....	173
Tabla 3. 10	Código Matlab	175
Tabla 3. 11	Entrenamiento de la red	176
Tabla 3. 12	Simulación de la red	177
Tabla 4. 1	Comparación del tiempo de respuesta en 4 litros.....	184
Tabla 4. 2	Comparación del tiempo de respuesta en 5 litros.....	186
Tabla 4. 3	Comparación del tiempo de respuesta en 6 litros.....	188
Tabla 4. 4	Comparación del tiempo de respuesta en 7 litros.....	190
Tabla 4. 5	Comparación del tiempo de respuesta en 8 litros.....	192
Tabla 4. 6	Comparación del tiempo de respuesta en 9 litros.....	194
Tabla 4. 7	Comparación del tiempo de respuesta en 10 litros.....	196
Tabla 4. 8	Comparación fuzzy y neuronal para 4 litros en LabVIEW.	198
Tabla 4. 9	Comparación fuzzy y neuronal para 5 litros en LabVIEW.	200

Tabla 4. 10	Comparación fuzzy y neuronal para 6 litros en LabVIEW.	201
Tabla 4. 11	Comparación fuzzy y neuronal para 7 litros en LabVIEW.	203
Tabla 4. 12	Comparación fuzzy y neuronal para 8 litros en LabVIEW.	204
Tabla 4. 13	Comparación fuzzy y neuronal para 9 litros en LabVIEW.	207
Tabla 4. 14	Comparación fuzzy y neuronal para 10 litros en LabVIEW.	209
Tabla 4. 15	Listado de Materiales	211

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A. Características de la Estructura (Tubo cuadrangular).
- ANEXO B. Propiedades de la plancha de madera MDF
- ANEXO C. Propiedades del acrílico
- ANEXO D. Características bomba thebe
- ANEXO E. Características ruedas móviles
- ANEXO F. Especificaciones técnicas Ni My Daq
- ANEXO G. Datos técnicos sensor ultrasónico
- ANEXO H. Características variador de velocidad
- ANEXO I. Planos eléctricos
- ANEXO J. Características fusible y porta-fusible
- ANEXO K. Características interruptor magneto térmico
- ANEXO L. Características guardamotor
- ANEXO M. Características contactor
- ANEXO N. Conductor eléctrico circuito de control
- ANEXO O. Conductor eléctrico circuito de potencia
- ANEXO P. Conductor eléctrico para la bomba
- ANEXO Q. Conductor eléctrico apantallado
- ANEXO R. Circuito Amplificador AD 620
- ANEXO S. Circuito Rectificador LF 353
- ANEXO T. Gráficas control difuso LABVIEW
- ANEXO U. Gráficas control neuronal LABVIEW

RESUMEN

La elaboración de este proyecto, consiste en el diseño y construcción de una planta inteligente, en la que permita realizar un control y monitoreo del nivel de líquido (agua), en un tanque contenedor, el mismo que se encuentra destinado al laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas **ESPE**, cabe mencionar, que el control de nivel de agua, está orientada a la medición de una variable física, selección de un controlador y ajuste de sus parámetros, además del uso de un sensor, capaz de medir el nivel del fluido del tanque antes mencionado. El diseño y construcción de este proyecto, se basa en aplicaciones específicas de un control inteligente, tales como: (*lógica difusa y redes neuronales*). El diseño del controlador, se lo realiza por medio de paquetes informáticos de instrumentación virtual gráfica (**LabVIEW, MATLAB**), aptos para la ejecución del proyecto. El capítulo uno, detalla la introducción, antecedentes, justificación, importancia, alcance del proyecto, objetivos y descripción general del proyecto. El capítulo dos, se describe el contenido teórico de cada uno de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos. El capítulo tres, se encuentra detallado el diseño y construcción del sistema. El capítulo cuatro, detalla las pruebas y análisis de resultados, provenientes de las gráficas de desempeño de los controladores. Y el quinto capítulo, se puntualiza, conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

PALABRAS CLAVES:
SISTEMAS DE CONTROL
CONTROL AUTOMÁTICO
SOFTWARE LABVIEW
MATLAB

ABSTRACT

The development of this project involves the design and construction of an intelligent plan, which allows to perform control and monitoring the level of liquid (water) in a holding tank, the same that is intended for industrial control lab University of ESPE Armed Forces, include that control water level, is aimed at measuring a physical variable, selecting a controller and set its parameters, and the use of a sensor capable of measuring the fluid level of the aforementioned tank. The design and construction of this project, is based on specific applications of smart, such as a control (fuzzy logic and neural networks). The design of the controller, it performs through computer graphics virtual instrumentation packages (LabVIEW, MATLAB), fit for project implementation. Chapter One details the introduction, background, rationale, importance, project scope, objectives and general description of the project. Chapter two, the theoretical content of each of the mechanical, electrical and electronic components is described. Chapter three, is detailed design and construction of the system. Chapter four details the testing and analysis of results from performance graphics controllers. The fifth chapter, it is pointed out, conclusions and recommendations of this project.

KEYWORDS:

CONTROL SYSTEMS

AUTOMATIC CONTROL

LABVIEW SOFTWARE

MATLAB

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los primeros estudios de sistemas de control, se basaban en la solución de ecuaciones diferenciales empleando medios clásicos. Salvo en los casos simples, el análisis en este camino es pesado y no indica fácilmente que cambios deben realizarse para mejorar la conducta del sistema.

El modelamiento matemático de la planta, ha llegado a ser la principal herramienta de la teoría de control para poder resolver los problemas que se presenten, sin embargo, esta tarea no siempre es fácil, y muchos de los casos es sumamente compleja o a veces imposible.

Debido a ello, se han recurrido a otras alternativas para deducir la respuesta adecuada de un sistema, sin tener que utilizar modelos matemáticos complejos. Por ello y con la necesidad de agilizar procesos cualquiera que este sea, nace el control inteligente, que no es más que una generalización del concepto de control y se puede ver como un campo dentro de la disciplina del control. Este a su vez tiene inmerso métodos desarrollados que sirven para emular algunas características importantes del ser humano. Estas características incluyen adaptación y aprendizaje, planeación bajo gran incertidumbre y el trabajo con gran cantidad de datos.

Las técnicas de control inteligente están siendo aplicadas a la robótica, las comunicaciones, la manufactura, el control de tráfico, por mencionar algunas pocas. Las áreas donde se está realizando trabajo alrededor del control inteligente son: **redes neuronales**, **control difuso**, algoritmos genéticos, sistemas de planeación, sistemas expertos y sistemas híbridos (combinación de más de una de las técnicas anteriores)

Con lo dicho anteriormente, se citan metodologías específicas como algunas de las más importantes tales como: Redes Neuronales (*Neuronal Networks*) y Control Difuso (*Fuzzy Control*), las mismas que en la actualidad, se han convertido en una poderosa herramienta de diseño alternativo para la solución de problemas con una amplia variedad de aplicaciones en sistemas de control.

1.2. Justificación e importancia

Cuando se pretende realizar el control de un sistema con metodologías convencionales, es fundamental y muy necesario, obtener un modelo matemático del proceso a ser regulado, pero si el sistema a gobernar es algo complejo, con un comportamiento temporal no constante, la tarea de obtener el modelo matemático puede ser muy complicado.

Para aquello, y mediante el empleo de metodologías inteligentes (Fuzzy y Redes Neuronales), se pueden implementar sistemas de control con mayor facilidad en comparación a métodos tradicionales, utilizando reglas o criterios provenientes de la experiencia del operador o el sentido común del mismo en clara referencia a la dinámica de la planta a ser controlada.

Debido a esto, es importante el estudio y el análisis de este tipo de controladores, comparando su funcionamiento con otras técnicas de control convencional.

Además, para discernir de mejor manera las características de las técnicas de control, es imprescindible el desarrollo de una aplicación, que además de simular un proceso industrial, permita analizar y comparar a los tipos de controladores.

1.3. Alcance del proyecto

El presente estudio, tiene como finalidad implementar una planta de nivel de líquidos para prácticas de laboratorio, en la que se pueda realizar dos tipos de controles inteligentes (Fuzzy Control y Neuronal Networks). Dicha planta se encuentra orientada a ser simulada, monitoreada, vigilada por los controladores antes mencionados.

Este prototipo de Laboratory Training (Módulo de Entrenamiento), se encuentra diseñado, conforme a nuevas e innovadoras tecnologías requeridas por la industria en la actualidad, dotando simultáneamente de conocimientos académicos invaluable, que hagan de la planta de nivel propuesta, un método de aprendizaje de campo útil, en pro y con visión de un futuro laboral exitoso, para aquellos estudiantes que sean benefactores del prototipo de entrenamiento de control inteligente.

Esta planta de laboratorio, dispone de componentes eficientes y de alta calidad para facilitar su uso y desempeño.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Realizar el diseño e implementación de una planta de nivel, controlada mediante redes neuronales y lógica difusa, destinada al laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

1.4.2. Específicos

- Recopilar y analizar los fundamentos teóricos de fuentes bibliográficas referentes a control difuso y redes neuronales artificiales (RNA).

- Identificar la ecuación de la tubería, tanque y bomba de agua de la planta mediante las leyes físicas propias de su funcionamiento.
- Diseñar y construir un sistema de entrenamiento para el control de nivel de líquidos.
- Seleccionar los componentes eléctricos y mecánicos, necesarios para la implementación del sistema de entrenamiento.
- Evaluar el desempeño del sistema de entrenamiento con cada uno de los controles establecidos.
- Documentar adecuadamente el proyecto.

1.5. Descripción general del proyecto

El presente proyecto describe la aplicación de métodos alternativos de control inteligente, para el monitoreo y control de una planta de nivel de líquidos. Dichos métodos implementados, se basan en la teoría de la lógica difusa (*Fuzzy Logic*) y redes neuronales (*Neuronal Networks*), así como también una breve descripción del software empleado (*LabVIEW*, *MATLAB*).- Cabe destacar que la única forma de interacción entre la aplicación y el usuario, es mediante su interfaz gráfica, la cual está inspirada en el diseño y funcionalidad de *Toolboxes* propios del software, tales como: *Neuronal Networks (NN)* y *Fuzzy Logic*.

En este trabajo, se detallan los fundamentos teóricos, en los que se basan el control difuso y las redes neuronales; además, se describe la metodología utilizada para el desarrollo de las aplicaciones previamente mencionadas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de control

2.1.1. Introducción

El propósito principal de un sistema de control en un proceso, cualquiera que este sea, es mantener estables o corregir las desviaciones existentes en las variables medidas, para lograr un funcionamiento estable del sistema en el punto que se desee, el buen funcionamiento del sistema se ve reflejado en la calidad del producto final.

Es un sistema que compara el valor de una variable a controlar con su valor deseado y cuando existe una desviación, efectúa una acción de corrección sin que exista intervención humana

2.1.2 Estructura de un sistema de control

Sistema: es la combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo.

Un sistema es un conjunto de variables que interactúan y generan señales observables. Además un sistema se ve afectado por estímulos externos los cuales se llaman entradas como se puede apreciar en la Figura 2.1

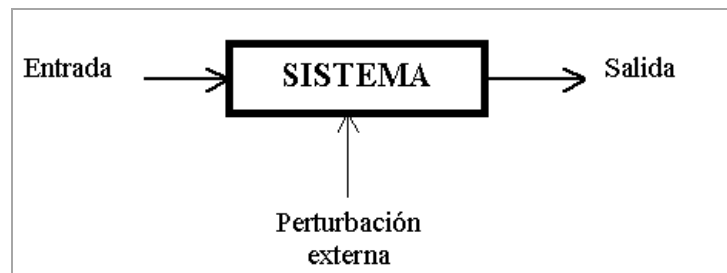


Figura 2. 1. Estructura de un Sistema de Control

Fuente: [16]

Variable de entrada: es una variable del sistema tal que una modificación de su magnitud o condición puede alterar el estado del sistema.

Variable de salida: es una variable del sistema cuya magnitud o condición se mide.

Perturbación: es una señal que tiende a afectar el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se la denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada.

2.1.3. Características de un sistema de control

Las principales características que se deben buscar en un sistema de control serán:

1. Mantener el sistema estable, independiente de perturbaciones y desajustes.
2. Conseguir las condiciones de operación objetiva de forma rápida y continua.
3. Trabajar correctamente bajo un amplio abanico de condiciones operativas.
4. Manejar las restricciones de equipo y proceso de forma precisa.

2.1.4. Tipos de sistemas de control [1]

Se puede hacer una clasificación de los sistemas de control atendiendo al procedimiento lógico usado por el controlador del sistema para regular la evolución del proceso. Los principales tipos de control utilizados en los procesos industriales se describen a continuación.

- **Control Lazo Abierto [2]**

El control de lazo abierto se caracteriza porque la información de las variables que controlan el proceso y circula en una sola dirección, desde el sistema de control al proceso, como se puede apreciar en la Figura 2.2. El sistema de control, no recibe la confirmación de las acciones que a través de los actuadores se han de realizar sobre el proceso. Sistema de control en el que la salida no tiene efecto sobre la acción del control.

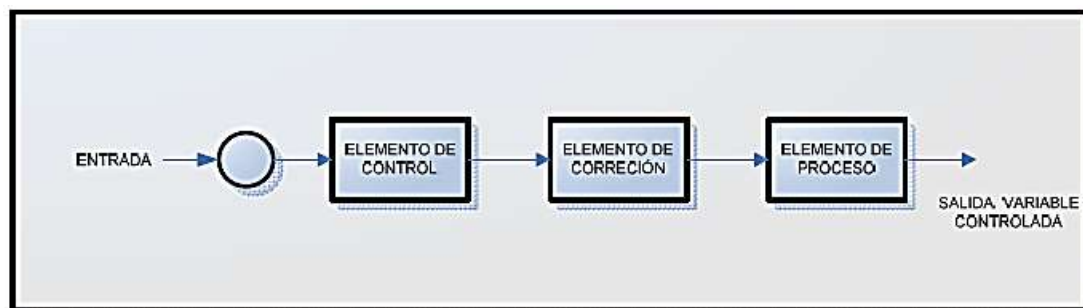


Figura 2. 2. Sistema de Control en Lazo Abierto

Fuente: [3]

- **Control en Lazo Cerrado**

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas o/y integrales) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente, tal como se

observa en la Figura 2.3. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentando para reducir el error del sistema.

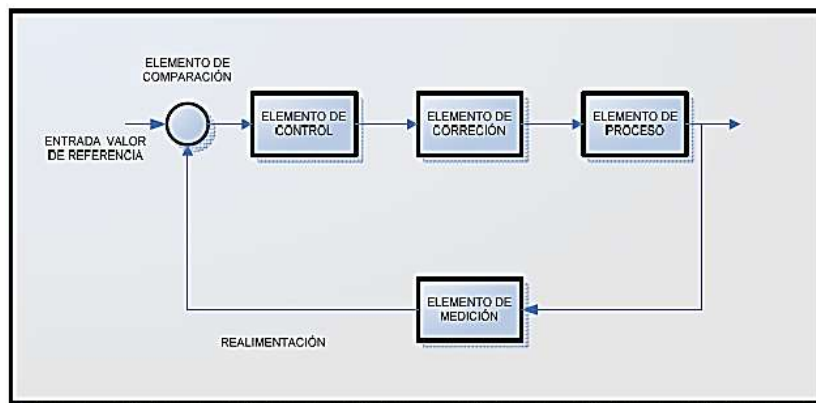


Figura 2. 3. Sistema de Control en Lazo Cerrado

Fuente: [2]

2.2. Control inteligente [3]

El control inteligente es una generalización del concepto de control y se puede ver como un campo dentro de la disciplina del control. El control inteligente es la disciplina donde los métodos de control se desarrollan para emular algunas características importantes del ser humano.

Estas características incluyen adaptación y aprendizaje, planeación bajo gran incertidumbre y el trabajo con gran cantidad de datos. Las metodologías de control inteligente están siendo aplicadas a la robótica, las comunicaciones, la manufactura, el control de tráfico, por mencionar algunas pocas. Las áreas donde se está realizando trabajo alrededor del control inteligente son: redes neuronales, control difuso, algoritmos genéticos, sistemas de planeación, sistemas expertos y sistemas híbridos (combinación de más de una de las técnicas anteriores).

2.3. Fundamentos de la lógica Fuzzy [4]

2.3.1. Conjuntos no difusos y difusos

La teoría de conjuntos clásica establece que un conjunto convencional es una colección de elementos que existen dentro de un universo. Por ejemplo si el universo consta de los números enteros no negativos y menores de 10:

$$U = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$$

Entonces se puede definir algunos conjuntos de este universo:

$$A = \{0,2,4,6,8\} ; B = \{1,3,5,7,9\} ; \text{etc.}$$

Cada conjunto se puede definir completamente mediante una función llamada de pertenencia que asigna un valor de 1, si el elemento pertenece al conjunto o 0 si no pertenece. Tomando como ejemplo el conjunto A, la función de pertenencia $\mu_A(x)$ sería:

$$\mu_A(0)=1, \mu_A(1)=0, \mu_A(2)=1, \mu_A(3)=0, \mu_A(4)=1, \mu_A(5)=0, \mu_A(6)=1, \mu_A(7)=0, \\ \mu_A(8)=1, \mu_A(9)=0$$

Por otro lado, un conjunto difuso define que un elemento pertenece parcialmente a un conjunto, así un conjunto C del universo, puede quedar definido de la siguiente manera:

$$C = \{30\%/2, 50\%/5, 100\%/8\}$$

El conjunto C indica que el elemento 2 pertenece en un 30% al conjunto C, el elemento 5 un 50% y el elemento 8 un 100%. La función de pertenencia de este conjunto sería la siguiente:

$$\mu_C(0)=0.0, \mu_C(1)=0.0, \mu_C(2)=0.3, \mu_C(3)=0.0, \mu_C(4)=0.0, \mu_C(5)=0.5, \\ \mu_C(6)=0.0, \mu_C(7)=0.0, \mu_C(8)=1.0, \mu_C(9)=0.0$$

Para entender de mejor manera, el hecho de pertenecer parcialmente a un conjunto, se define el siguiente ejemplo:

Se desea definir el conjunto de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas (**ESPE**) que está cursando el quinto semestre de la carrera. Cómo clasificar a un estudiante que cursa dos materias de cuarto semestre, tres de quinto y una de sexto? y a otro que toma una materia de quinto semestre, y cinco de sexto? Evidentemente ambos son en parte miembros del conjunto estudiantes de quinto semestre, pero sólo lo son parcialmente, ya que a más de tomar materias de quinto semestre, toman materias de otros niveles.

2.3.2 Tipos de Funciones de Pertenencia

La función de pertenencia de un conjunto indica el grado en que un determinado elemento de un universo pertenece a un conjunto. La función de pertenencia es una forma de representar gráficamente un conjunto difuso sobre un universo. Existen diferentes tipos de funciones de pertenencia (función gamma, función sigma, función trapezoidal, función gaussiana), para propósitos prácticos, las funciones triangular y trapezoidal son las estándar. Ellas pueden ser descritas con 3 o 4 puntos y por lo tanto no causan mucho gasto computacional⁵.

Una función de pertenencia muy destacada es la unitaria o singleton, en la que solo se toma en cuenta la altura de la cima. En la figura. 2.4 se puede ver la función de pertenencia singleton, la cual es igual a cero para todos los casos.

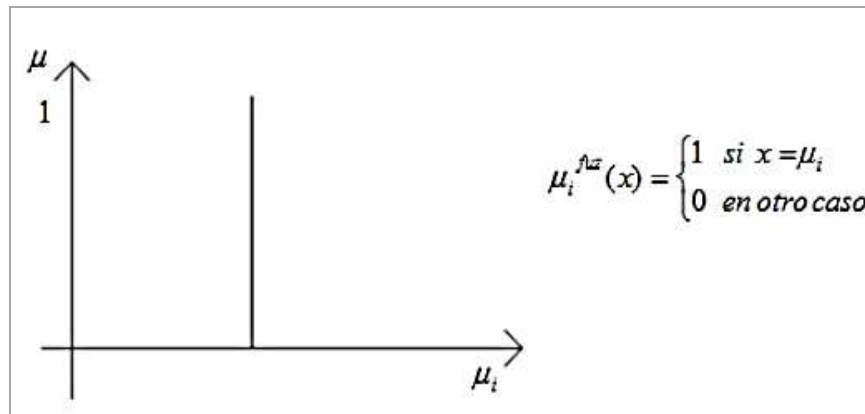


Figura 2. 4. Función de Pertenencia Unitaria o Singleton

Fuente: [5]

Ejemplo: Monitorización de presión en una planta de proceso.

El operador de una planta de procesamiento determina una presión de 100 bares como óptima para el proceso de producción. Sin embargo, el operador permitió un rango de operación de 80 a 120 bares como aceptable (“Buena Presión”). La figura. 2.5 muestra la diferencia entre el conjunto de valores de presión “Buena Presión” definiendo tanto un conjunto no difuso y un conjunto difuso. La representación de los valores de pertenencia (grados de pertenencia) mediante los elementos del conjunto (aquí valores de presión) es la función de pertenencia.

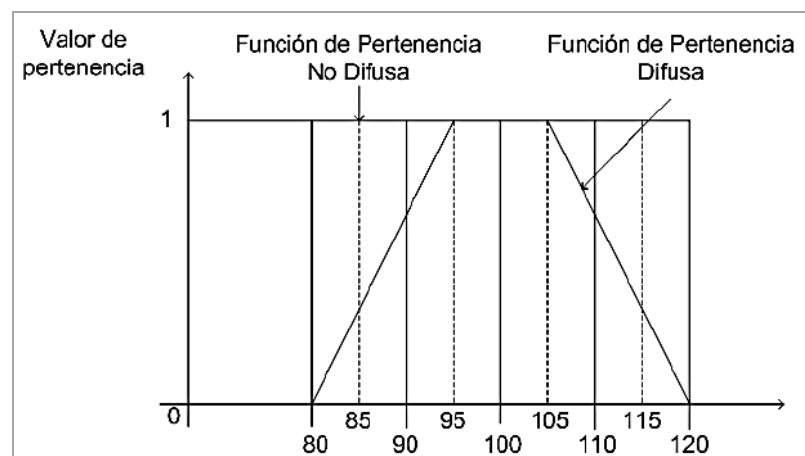


Figura 2. 5. Función de Pertenencia

Fuente: [5]

El operador se prepara para tomar acción cuando la presión mostrada alcanza 115 bares ya que la presión puede solo ser considerada 30% buena. Un control binario con un valor umbral contactado a 120 bares no podría realizar tal operación calificada e interpretaría la situación de repente cuando el valor de presión se vaya al conjunto no difuso. El operador, por otro lado, puede reconocer valores críticos y tendencias con anticipación y puede por tanto reaccionar a tiempo tomando algunas medidas necesarias para contrarrestar

Para imitar este comportamiento es necesario usar un sistema difuso en lugar de un control binario.

2.3.3 Operaciones entre Conjuntos Difusos

Debido a que los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos convencionales, se pueden definir las operaciones de unión, intersección y complemento. Sean $\mu_A(X)$ y $\mu_B(X)$ las funciones de pertenencia correspondientes a los conjuntos difusos A y B, como se indican en las figuras. 2.6 y 2.7, se tiene:

- Unión u OR: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Ver figura. 2.8.
- Intersección o AND: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Ver figura. 2.9.
- Complemento o NOT: $\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$. Ver figura. 2.10.

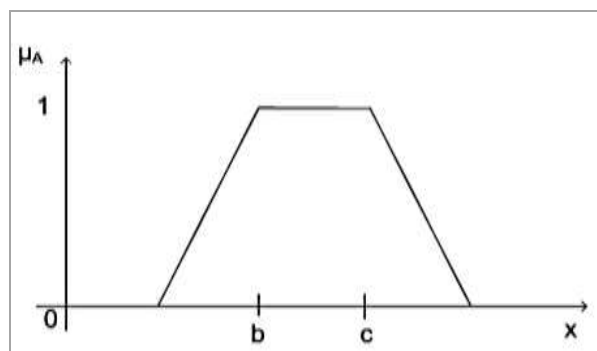


Figura 2. 6. Conjunto Difuso A

Fuente: [5]

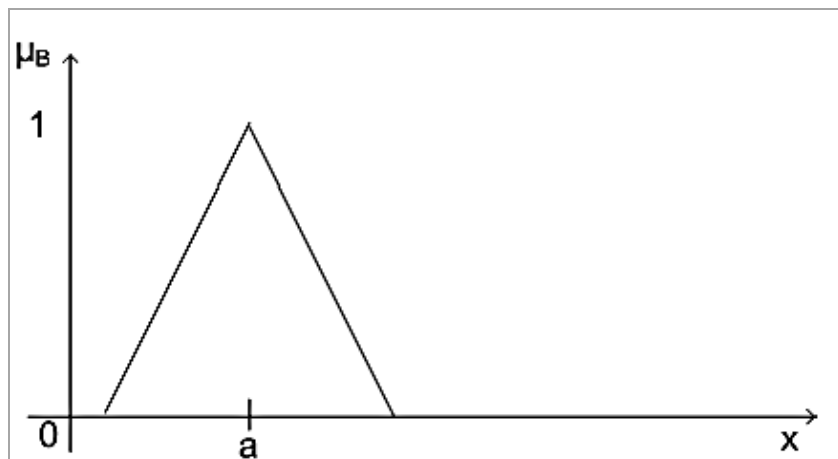


Figura 2. 7. Conjunto difuso B

Fuente: [5]

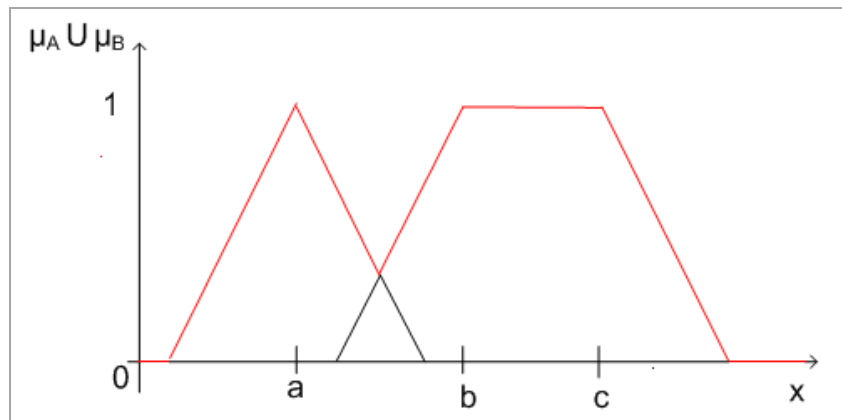


Figura 2. 8. Unión entre A y B

Fuente: [5]

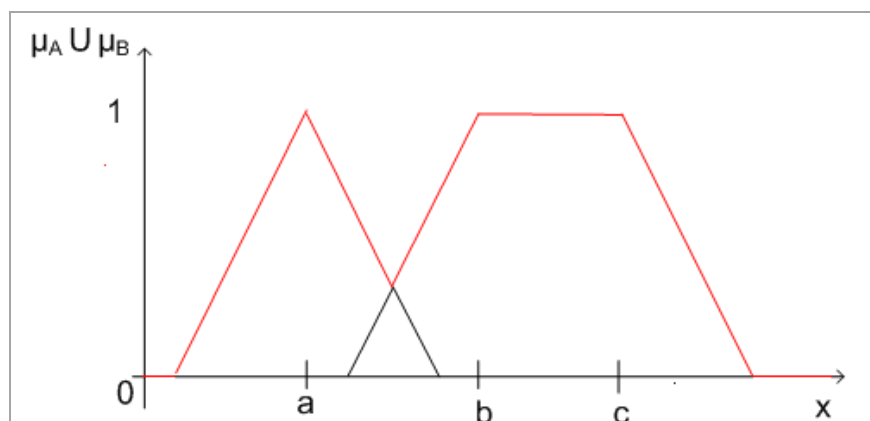


Figura 2. 9. Unión entre A y B

Fuente: [5]

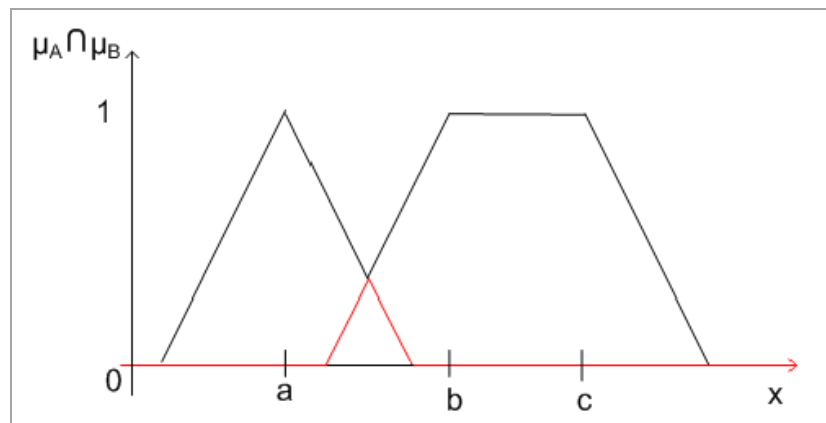


Figura 2. 10. Intersección entre A y B

Fuente: [5]

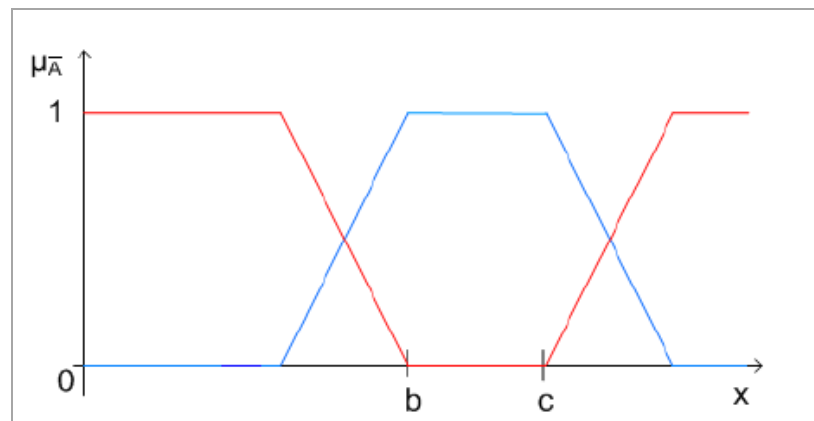


Figura 2. 11. Complemento de A

Fuente: [5]

2.4. Control Fuzzy [5]

2.4.1. Características del Control Difuso

Entre sus principales características están:

1. El control difuso es *lógico*. El denominador de lógico significa que el algoritmo de control utiliza expresiones *IF-THEN*, con las que se pueden mencionar muchas condiciones, combinando expresiones lógicas con *IF* y *AND*.

2. El control difuso es *disperso*. Esta característica, que diferencia básicamente los sistemas de control difuso de los sistemas de control basados en una sola ecuación, admite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su actuación en paralelo.
3. El control difuso es *lingüístico*. Permite el uso de variables lingüísticas imprecisas, en particular en los antecedentes de las reglas. Dicho lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite efectuar el control por medio de un diálogo con los operadores, usando sus ojos experimentados en la observación del proceso como entradas externas, e introducir variables como las condiciones del proceso a modo de información útil para el control.

2.4.2. Diseño de controladores difusos

El proceso de diseño de controladores difusos está dividido en tres etapas fundamentales:

1. Fuzzificación
2. Implicación o inferencia
3. Defuzzificación

El funcionamiento de un controlador difuso sigue este orden en las etapas mencionadas, de tal forma que el resultado a la salida de cada una de ellas depende exclusivamente de los valores encontrados en la etapa inmediatamente anterior.

El controlador tiene como entradas a la referencia y a la salida del proceso, como salida del controlador tenemos a las variables que se conectan a la entrada de los actuadores.

Normalmente las variables de entrada (referencia y salida del proceso) necesitan un procesamiento para que lleguen al corazón del controlador

difuso, es decir al sistema de inferencia propiamente dicho, a esta etapa se le llama pre-procesado, las operaciones comunes aquí son escalamiento, conversión a digital, eliminación de ruido y tendencias, obtención de la señal de error, derivación e integración. La salida también puede requerir algún tipo de procesamiento, a este se le llama post-procesado. El tipo de controlador es determinado por el pre-procesado, aunque el post-procesado también puede determinar el tipo de controlador. En la Figura 2.12 se puede observar un esquema general y otro particular de controlador difuso.

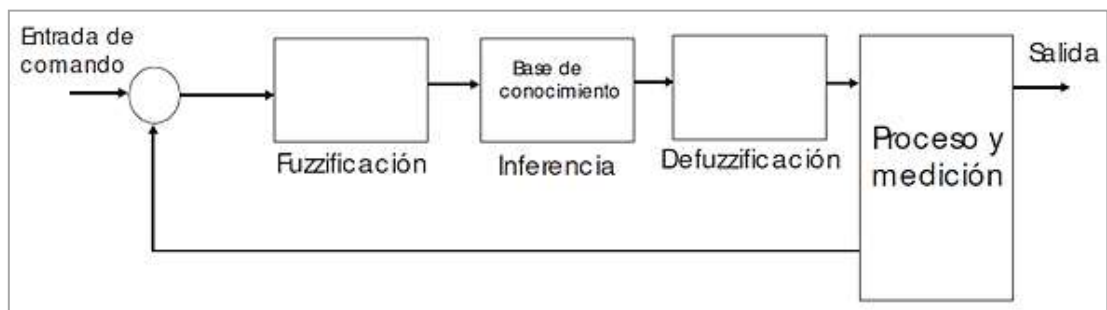


Figura 2. 12. Esquema de un control difuso

Fuente: [5]

2.4.3. Fuzzificación

En esta etapa del proceso se realiza la traducción de la variable medida al lenguaje del controlador. Así, el valor encontrado será expresado en términos del conjunto difuso y su grado de pertenencia al mismo.

Un mismo valor puede pertenecer a varios conjuntos, si éstos se encuentran traslapados, lo que dará como resultado que se entreguen múltiples valores de pertenencia para cada variable medida, además es posible que se esté trabajando con más de una variable.

Para realizar el diseño de esta etapa se deben tener en cuenta varios factores, tales como:

- El universo de discurso o rango de trabajo sobre el cual operan los conjuntos difusos debe contener todos los valores posibles de la variable medida del sistema.
- Los conjuntos difusos pueden aceptar muchas formas, sin embargo, para escoger la más conveniente se debe tomar aquella que permita representar con mayor precisión el comportamiento del sistema y que al mismo tiempo pueda ser descrita a través de los dispositivos de hardware utilizados de la forma menos compleja.
- La posición y forma de los conjuntos debe estar en relación directa con el conocimiento adquirido del proceso, de tal manera que la información expresada por cada conjunto represente, con la mayor fidelidad posible, el comportamiento del sistema.

2.4.4. Implicación o inferencia

La implicación define la etapa donde se evalúan las reglas de inferencia difusa con el fin de dar una respuesta adecuada del sistema ante los valores presentes.

Para la elaboración de las reglas se toman en cuenta cada una de las situaciones posibles, lo que lleva a inferir una respuesta para cada caso.

El resultado de la inferencia difusa es una variable lingüística en la cual la forma de sus conjuntos difusos, además de haber sido definida previamente, es el resultado de relacionar la salida de cada regla con el conjunto asociado a su respuesta. El proceso de diseño de esta etapa requiere:

- Definir la variable lingüística de salida (variable controlada) determinando las características de sus conjuntos de la misma forma que se hizo con los conjuntos de entrada.

- Elaborar una base de conocimientos que permita determinar las acciones adecuadas del controlador en forma de reglas.
- Elaborar el conjunto de reglas de control que determinarán el comportamiento del sistema; dichas reglas tendrán la estructura:

Si X y Y, entonces Z

Donde X y Y son los conjuntos difusos de la entrada, para el caso de dos variables, y Z son los conjuntos de salida.

2.4.5. Defuzzificación

La respuesta de la evaluación de las reglas difusas se encuentra contenida en el conjunto de salida, y está dada por los valores de pertenencia asignados a cada conjunto que determinan una nueva forma para cada uno de ellos. En este punto se tiene la respuesta del controlador en términos de cada conjunto de salida. Sin embargo, es necesario obtener un único valor de salida y que se encuentre en términos numéricos.

Para obtener la respuesta deseada se debe llevar a cabo un proceso inverso a la Fuzzificación, conocido como defuzzificación. Para realizar esta tarea existen varios métodos, pero ninguno se considera más apropiado que otro, por lo cual el usuario puede elegir su método de acuerdo a los requerimientos que exige el sistema.

Las técnicas de defusificación más usadas son:

- Centroide o Centro de las Áreas (COA o Center of Areas)
- Centro de las Sumas (COS o Center of Sums)
- Media de los Máximos (MOM o Mean of Maxima)
- Promedio de los Centros (CA o Center Average)

La herramienta de programación en estudio utiliza el método del centro de gravedad o centroide, el cual es simple cuando los conjuntos de salida son funciones de pertenencia tipo “*singletons*”.

2.4.6. Ventajas y desventajas del control difuso

Una de las ventajas más importantes es la falta de ecuaciones complicadas tales como ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales necesarias cuando se tiene la función de transferencia que describa el proceso a ser automatizado.

El manejo de variables lingüísticas permite plantear el problema en las mismas expresiones en las que lo haría un experto humano facilitando el diseño y uso de sistemas difusos.

Pero no usar un modelo matemático es también una fuente de incertidumbre, pues los muchos grados de libertad en el diseño de sistemas de control difusos puede ser una desventaja especial.

Algunas de las ventajas del control con lógica difusa son:

- Fácil ejecución de reglas expresadas verbalmente (si..., entonces...) sobre un computador para resolver un problema.
- El comportamiento de un sistema difuso es entendible para los seres humanos.
- En comparación con otros métodos, evita el costoso desarrollo de una descripción matemática.
- El control difuso cubre un amplio rango de parámetros del sistema y puede afrontar la mayoría de las perturbaciones.

Algunas de sus desventajas son:

- La definición de tareas sin suficiente conocimiento del sistema y poco o muy impreciso conocimiento del comportamiento del sistema resultan en malas, posiblemente inutilizables soluciones difusas.
- Usualmente no posee capacidad de adaptabilidad y aprendizaje si el comportamiento del sistema cambia.
- El diseño de un sistema de control difuso requiere experiencia debido a los muchos grados de libertad.
- Aún no están bien formalizadas las características necesarias para que el control difuso sea robusto y estable.

2.4.7. Aplicación de un control difuso “péndulo invertido”

El problema está en equilibrar una pértiga sobre una plataforma móvil que puede moverse en dos únicas direcciones, a la izquierda o a la derecha. Ante todo, se tiene que definir cuál es la velocidad del andén: alta, baja, etc. Esto se hace para especificar las funciones pertenecientes al conjunto difuso:

- negativo alto (celeste)
- negativo bajo (verde)
- cero (rojo)
- positivo bajo (azul)
- positivo alto (morado)

La figura 2.13 muestra las funciones de pertenencia de la velocidad del andén.

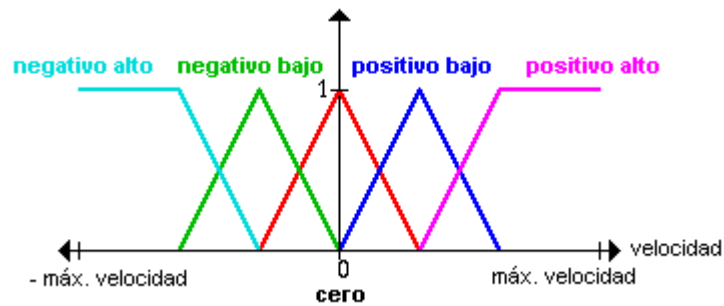


Figura 2. 13. Funciones de pertenencia de la velocidad del andén

Fuente: [5]

Lo mismo se hace para el ángulo entre la plataforma y la pértiga, además para la velocidad angular de este ángulo, tal como se ilustran en las figuras 2.13 y 2.14.

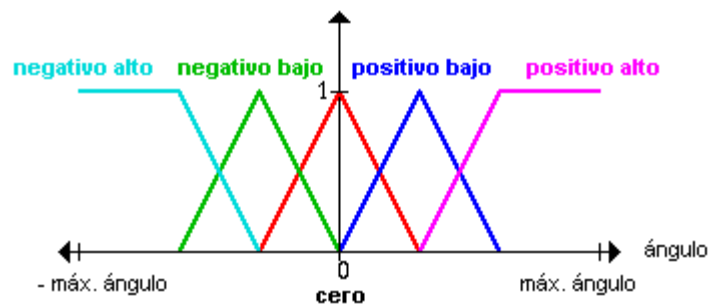


Figura 2. 14. Funciones de pertenencia del ángulo entre la plataforma y la pértiga

Fuente: [5]

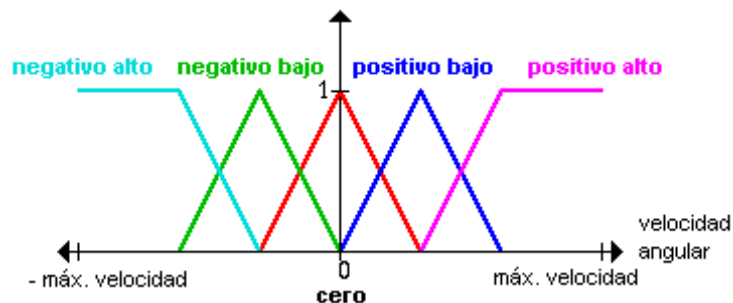


Figura 2. 15. Funciones de pertenencia de la velocidad angular del ángulo entre la plataforma y la pértiga

Fuente: [5]

Para hacerlo más fácil, se supone que al principio la pértiga está en una posición cercana a la central para que un ángulo mayor de 45 grados en cualquier dirección no pueda por definición ocurrir.

Ahora se procede a dar varias reglas que dicen qué hacer en situaciones concretas:

- Si por ejemplo la pértiga está en la posición central (el ángulo es cero) y no se mueve (la velocidad angular es cero). Obviamente esta es la situación deseada, y por lo tanto no hay que hacer nada (la velocidad es cero).
- Si el polo está en la posición central como antes, pero está en movimiento a baja velocidad en la dirección positiva. Se tiene que compensar el movimiento de la pértiga moviendo la plataforma en la misma dirección a baja velocidad.

De esta forma se han constituido dos reglas que pueden ponerse en una forma más formalizada como esta:

- Si el ángulo es cero y la velocidad angular es cero entonces la velocidad será cero.
- Si el ángulo es cero y la velocidad angular es positiva baja entonces la velocidad será positiva baja.

Se puede resumir todas las reglas aplicables como se ilustra en la tabla 2.1.

Donde los valores en letras rojas NA es una (usual) abreviatura para negativa alta, NB para negativa baja, etc.

Tabla 2. 1

Reglas velocidad en función del ángulo entre la plataforma y pértiga y la velocidad angular entre la plataforma y la pértiga

Velocidad	Angulo				
	NA	NB	C	PB	PA
NA			NA		
NB			NB	C	
C	NA	NB	C	PB	PA
PB		C	PB		
PA			PA		

Fuente: [5]

A continuación se muestra cómo estas reglas pueden aplicarse con valores concretos para el ángulo y velocidad angular. Para ello se va a definir dos valores explícitos para el ángulo y la velocidad angular para operar con ellos, tal como se observa en las figuras 2.15 y 2.16 respectivamente.

Se considera la situación siguiente:

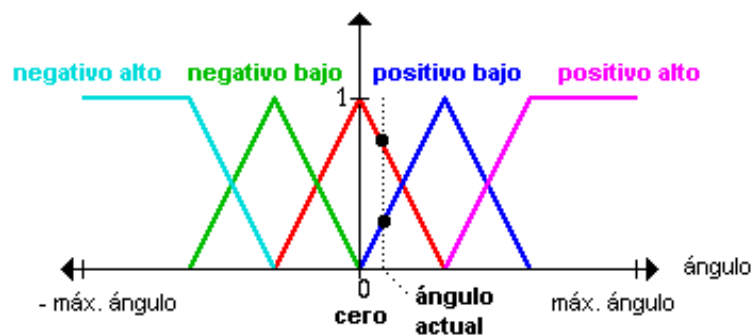


Figura 2. 16. Valor actual para un ángulo

Fuente: [5]

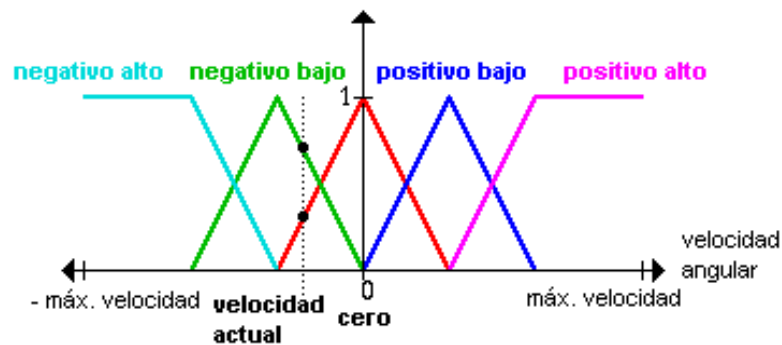


Figura 2. 17. Valor actual para la velocidad angular

Fuente: [5]

Ahora se mostrará cómo aplicar las reglas a esta situación real.

Si el ángulo es cero y la velocidad angular es cero entonces la velocidad será cero. Se centra en el conjunto "cero" y el ángulo actual. Se puede observar que el valor real pertenece al conjunto difuso "cero" en un grado de 0.75 como se ve en la figura 2.18

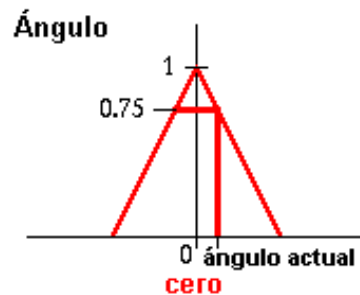


Figura 2. 18. Grado de pertenencia del valor actual del ángulo con respecto a la variable lingüística ángulo

Fuente: [5]

Ahora se muestra la variable lingüística "velocidad angular". Se puede observar que el valor real pertenece al conjunto difuso "cero" en un grado de 0.4 (Figura 2.19):

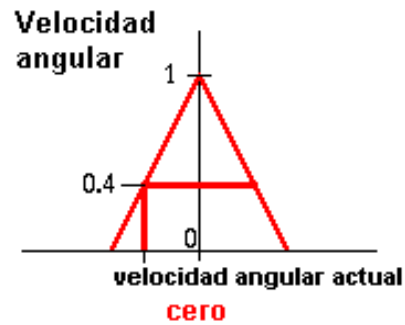


Figura 2. 19. Grado de pertenencia del valor actual de la velocidad angular con respecto a la variable lingüística velocidad angular.

Fuente: [5]

Como las dos partes de la condición de la regla están unidas por una Y (operación lógica AND) se calcula el mín. $(0.75, 0.4)=0.4$ y se corta el conjunto difuso "cero" de la variable "velocidad" a este nivel (según la regla), figura 2.20:

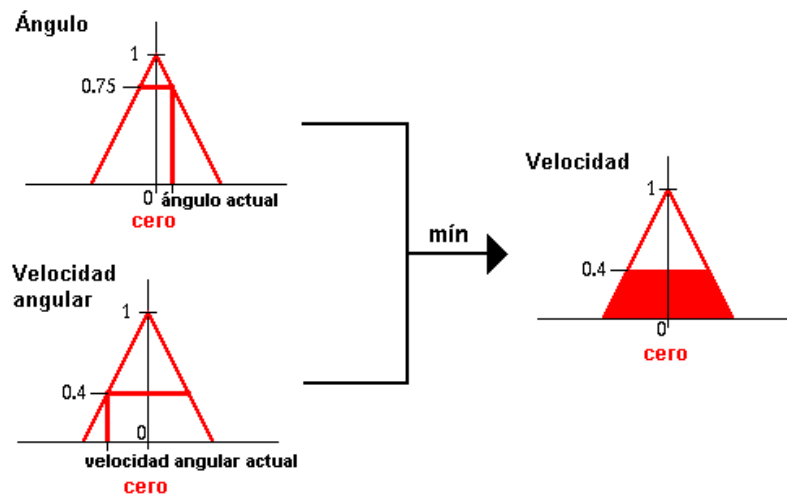


Figura 2. 20. Cálculo del mínimo de las dos partes de la condición de la regla

Fuente: [5]

Por su parte, el resultado de la regla “si el ángulo es cero y la velocidad angular es negativa baja entonces la velocidad será negativa baja” se muestra en la figura 2.21.

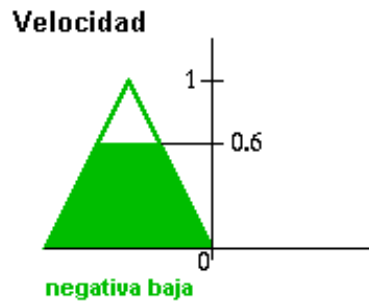


Figura 2. 21. Resultado de la velocidad si el ángulo es cero y la velocidad angular es negativa baja

Fuente: [5]

El resultado de la regla “si el ángulo es positivo bajo y la velocidad angular es cero entonces la velocidad será positiva baja” se muestra en la figura 2.22.

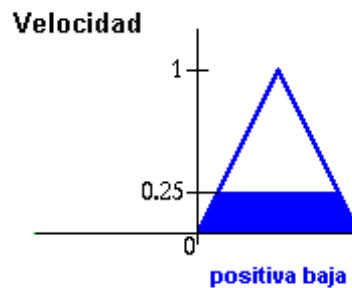


Figura 2. 22. Resultado de la velocidad si el ángulo es positivo bajo y la velocidad angular es cero

Fuente: [5]

El resultado de la regla “si el ángulo es positivo bajo y la velocidad angular es negativa baja entonces la velocidad será cero” se muestra en la figura 2.23.

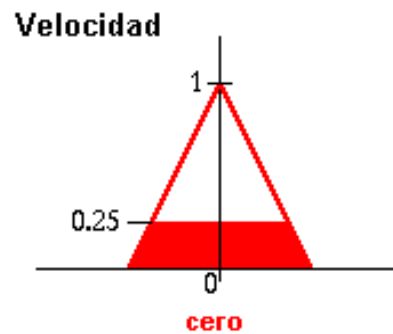


Figura 2. 23. Resultado de la velocidad si el ángulo es positivo y la velocidad angular es negativa baja

Fuente: [5]

Estas cuatro reglas solapadas desembocan en un resultado único, mostrado en la figura 2.24.



Figura 2. 24. Resultado de las cuatro reglas solapadas

Fuente: [5]

El resultado del controlador difuso es un conjunto difuso (de velocidad), así que se tiene que escoger un valor representativo como salida final. Hay varios métodos heurísticos (métodos de claridad o defusificación), uno de ellos es tomar el centro de gravedad del conjunto difuso.

La figura 2.25 muestra el valor final que tendría la velocidad calculando el centro de gravedad.

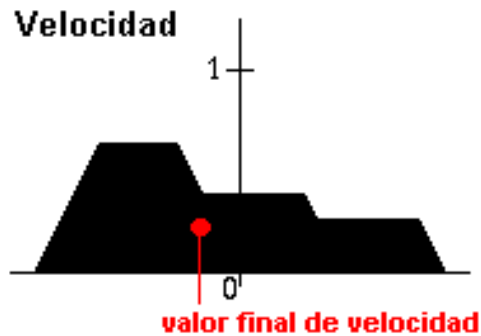


Figura 2. 25. Valor final de la velocidad usando el centro de gravedad

Fuente: [5]

2.5. Redes neuronales artificiales (R.N.A.) [6]

2.5.1. Introducción

Las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) son la implementación en hardware y/o software de modelos matemáticos idealizados de las neuronas biológicas. Las neuronas artificiales son interconectadas unas a otras y son distribuidas en capas de tal forma que emulan en forma simple la estructura neuronal de un cerebro. Cada modelo de neurona es capaz de realizar algún tipo de procesamiento a partir de estímulos de entrada y ofrecer una respuesta, por lo que las RNA en conjunto funcionan como redes de computación paralelas y distribuidas similares a los sistemas cerebrales biológicos. Sin embargo, a diferencia de las computadoras convencionales, las cuales son programadas para realizar tareas específicas, las redes neuronales artificiales, tal como los sistemas cerebrales biológicos, deben ser entrenadas.

Una red neuronal es un procesador distribuido en paralelo, que puede filtrar y procesar las informaciones y tener una decisión. Una red neuronal se parece al cerebro en dos ideas básicas:

- La red necesita una cantidad de información para entrenarse.

- Las conexiones entre las neuronas se usan para almacenar las informaciones.

El uso de las redes neuronales ofrece muchas propiedades y capacidades, como el aprendizaje adaptativo, auto-organizativas, funcionamiento en paralelo en tiempo real y tolerancia de fallos por la codificación redundante de la información. Desde punto de vista de solucionar problemas, las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales, mientras que las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y también pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no estaban incluidos durante el proceso del diseño. Las redes neuronales pueden procesar las informaciones más rápido que los ordenadores convencionales, pero tiene la desventaja de que no podemos seguir su respuesta paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador por lo que no resulta fácil detectar los errores.

En una neurona biológica, ver figura 2.26, se puede distinguir cuatro partes fundamentales: el soma, el axón y las sinapsis. [7]

a) El soma

El soma o núcleo de la célula es la parte central redonda donde se realizan casi todas las funciones lógicas de la neurona.

b) El axón

El axón es una fibra nerviosa conectada directamente con el soma y que sirve como canal de salida. El axón usualmente está muy ramificado para permitir su conexión a un gran número de neuronas. En estos sistemas biológicos las señales son secuencias de impulsos que se propagan por el axón sin atenuación.

c) Las dendritas

Las dendritas son las entradas de información a la neurona. Son un grupo de fibras muy ramificadas y de forma irregular que se conectan directamente al soma. Se calcula entre 10³ y 10⁴ el número de dendritas en una neurona, permitiendo que esta reciba información de un gran grupo de otras neuronas.

d) Las sinapsis

Sinapsis son contactos especializados entre los axones y las dendritas de diferentes neuronas. Estas sinapsis pueden cambiar la polaridad de los potenciales provenientes de otras neuronas y en estos casos se suele hablar de naturaleza excitadora o inhibitora según sea su función para la excitación o bloques de la neurona. Se considera que el almacenamiento de la información está concentrado en estas conexiones sinápticas. Se conoce que en el sistema nervioso de los seres humanos estas conexiones sinápticas son de naturaleza química muy compleja a diferencia de los insectos que tienen conexiones de transmisión eléctrica simples.

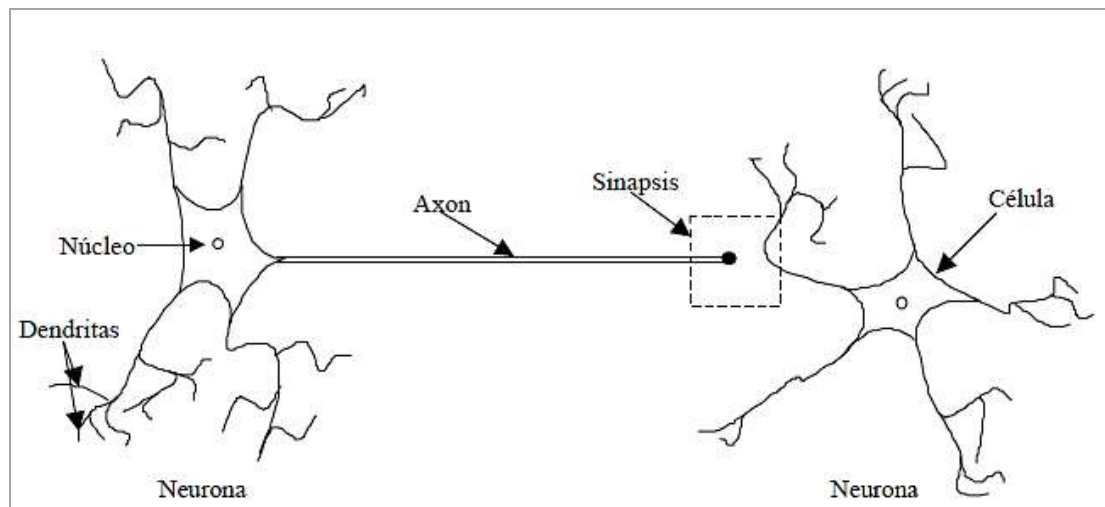


Figura 2. 26. Modelo de una neurona biológica

Fuente: [7]

McCulloch y Pitts construyeron un modelo básico de neurona artificial, con una neurona muy simple a base de un sumador y una función de activación. Las conexiones (sinapsis) de una neurona se consideran como se muestra en la figura 2.27. En ellas, las activaciones X_i con unas determinadas intensidades W_{ji} de otras neuronas son sumadas, y se permite que en la salida de la neurona (axón) se origine una actividad siempre que la suma $W_{ji} X_i$ supere un valor umbral (θ_j)

La expresión matemática de esta neurona es: *poner en el editor de ecuaciones*

$$y_j = \varphi \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + \theta_j \right) \quad (2.1)$$

Donde w_{ji} son los pesos sinápticos que ponderan las entradas x_i y θ_j es el umbral. φ es la función de activación de la neurona y n es número total de pesos sinápticos conectados a entrada de la neurona. En algunos libros

incluyen el umbral dentro de las entradas y de pesos quedando expresada la salida de neurona como: *poner con el editor de ecuaciones*

$$y_i = \varphi \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i \right)$$

(2.2)

Con $X_0 = \pm 1$, y $W_{j0} = \theta_j$ dando una presentación más compacta. Como función de activación, ϕ , se pueden usar muchas funciones, pero las más usadas para los casos no lineales son las sigmoides. En la sección siguiente se explican las funciones de activación más utilizadas en redes neuronales.

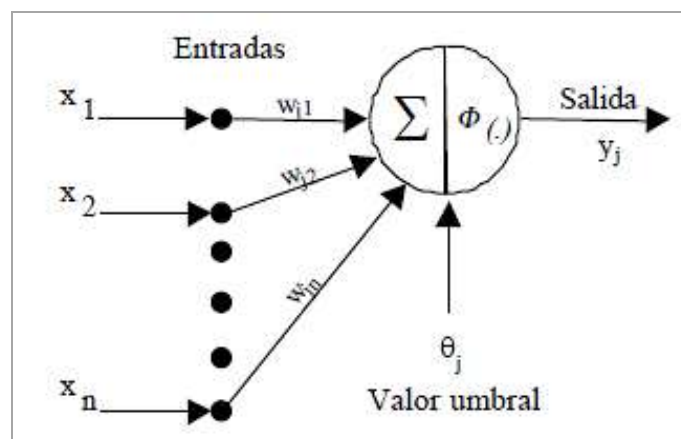


Figura 2. 27. Modelo de una neurona artificial

Fuente: [7]

2.5.2. Entradas y salidas

Las entradas y salidas de una neurona pueden ser clasificadas en dos grandes grupos, binarias o continuas. Las neuronas binarias (digitales) sólo admiten dos valores posibles. En general en este tipo de neurona se utilizan los siguientes dos alfabetos $\{0,1\}$ o $\{-1,1\}$. Por su parte, las neuronas continuas (analógicas) admiten valores dentro de un determinado rango, que en general suele definirse como $[-1, 1]$.

La selección del tipo de neurona a utilizar depende de la aplicación y del modelo a construir.

2.5.3. Pesos sinápticos

El peso sináptico, W_{ji} , define la fuerza de una conexión sináptica entre dos neuronas, la neurona presináptica i y la neurona postsináptica j . Los pesos sinápticos pueden tomar valores positivos, negativos o cero. En caso de una entrada positiva, un peso positivo actúa como excitador, mientras que un peso negativo actúa como inhibidor. En caso de que el peso sea cero, no existe comunicación entre el par de neuronas.

Mediante el ajuste de los pesos sinápticos la red es capaz de adaptarse a cualquier entorno y realizar una determinada tarea.

2.5.4. Regla de propagación

La regla de propagación determina el potencial resultante de la interacción de la neurona i con las N neuronas vecinas. El potencial resultante h_i se puede expresar de la siguiente manera: *poner con el editor de ecuaciones*

$$h_i(t) = \sigma_i(w_{ij}, x_j(t)) \quad (2.3)$$

La regla de propagación más simple y utilizada consiste en realizar una suma de las entradas ponderadas con sus pesos sinápticos correspondientes: *poner con el editor de ecuaciones*

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} * x_j(t) \quad (2.4)$$

2.5.5. Funciones de activación

En esta sección, se presenta las funciones las que más utilizaciones en estructuras de red neuronal artificial. Las funciones sigmoideas y lineales siempre usan en las redes neuronales con propagación hacia adelante.

a) Función escalón de conexión o desconexión

Esta función define frecuentemente denominada escalón de dos posiciones (sí o no). La salida de esta función es, o bien una constante positiva, una constante negativa o cero. Esta función posee una discontinuidad en un punto que imposibilita la evaluación de la derivada en dicho punto. La figura 2.28 se representa la familia de estas funciones.

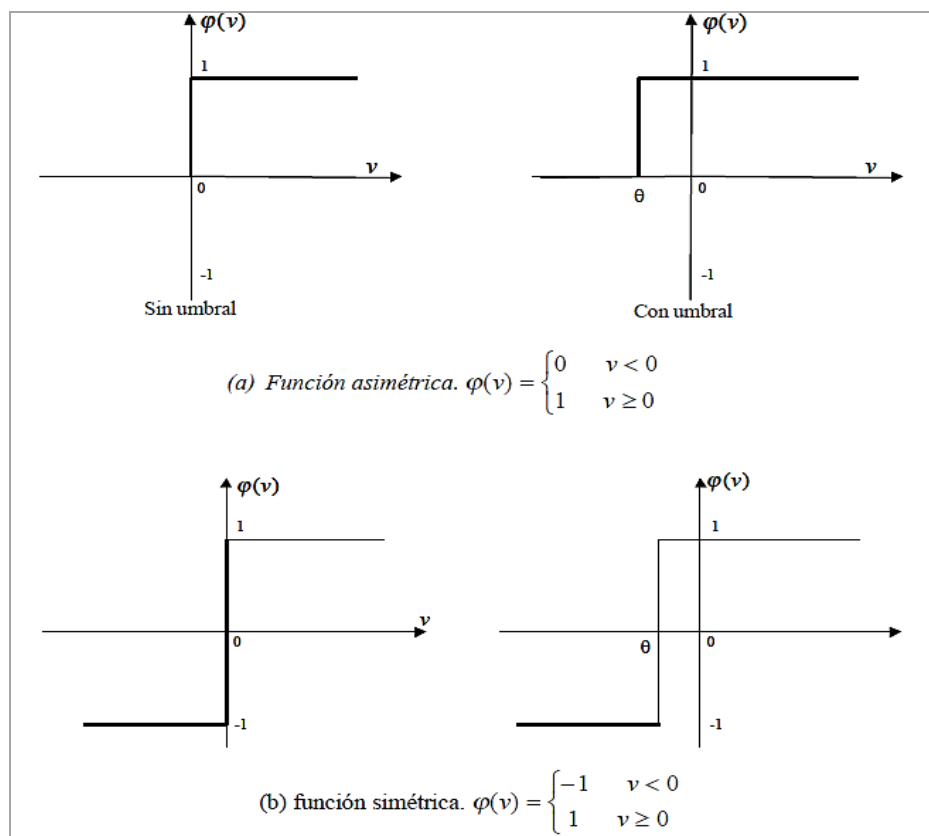


Figura 2. 28. Función escalón de conexión y desconexión.

Fuente: [7]

b) Función saturación lineal

Función saturación lineal es similar a la función de escalón de conexión o desconexión, salvo que en un rango determinado de la variable de entrada. La salida tiene un comportamiento proporcional. La figura 2.29 se muestra tan solo dos discontinuidades en su derivada.

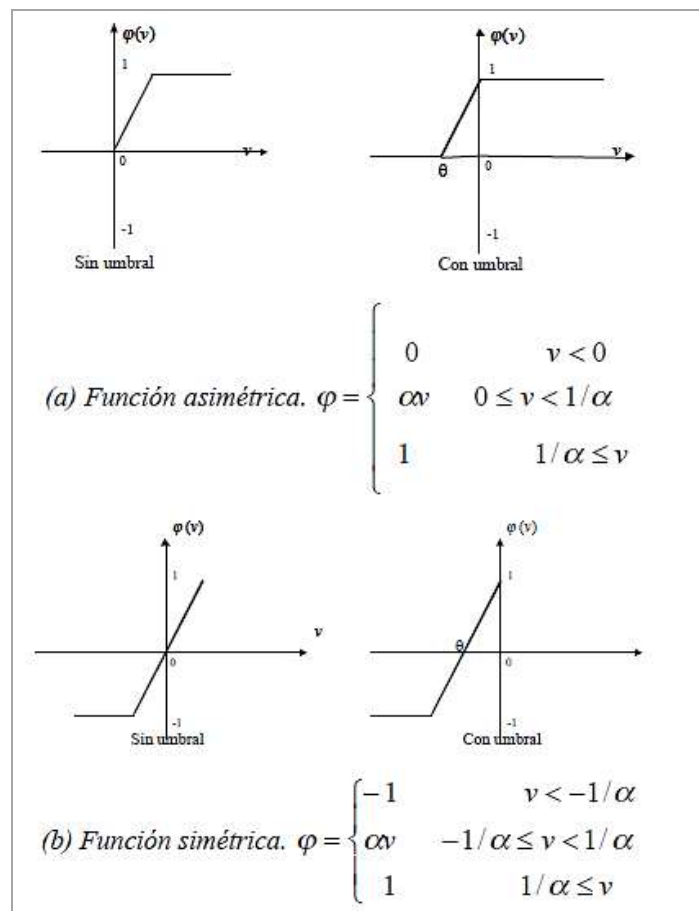


Figura 2. 29. Función saturación lineal

Fuente: [7]

c) Función sigmoideal asimétrica

Es una función binaria, continua y diferenciable en todo su dominio. La figura 2.30 expone una representación de esta función.

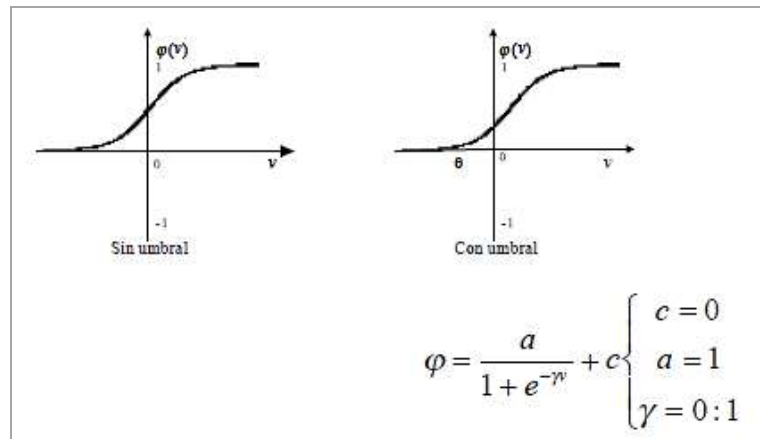


Figura 2. 30. Función sigmoial asimétrica

Fuente: [7]

d) Función sigmoial simétrica

Esta función también denominada tangente hiperbólica es completamente diferenciable en todo su dominio, monótonamente creciente y posee una característica bipolar. La figura 2.29 se representa el gráfico de esta función.

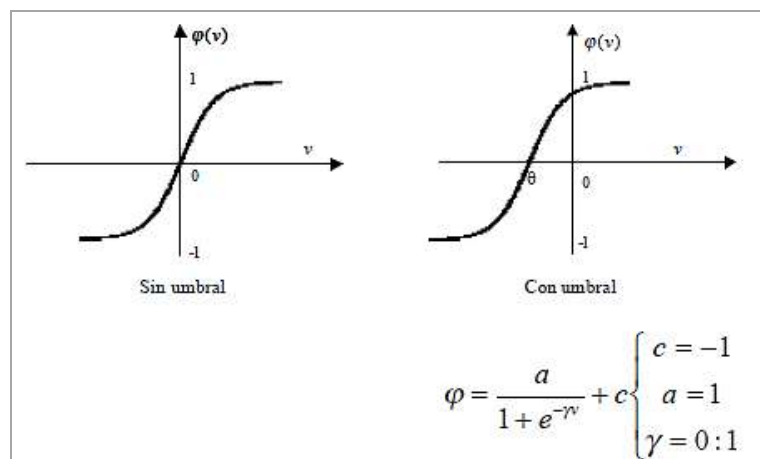


Figura 2. 31. Función sigmoial simétrica

Fuente: [7]

e) Función lineal

Esta función posee una característica tipo lineal como se observa en figura 2.32, la cual no tiene límites en su rango.

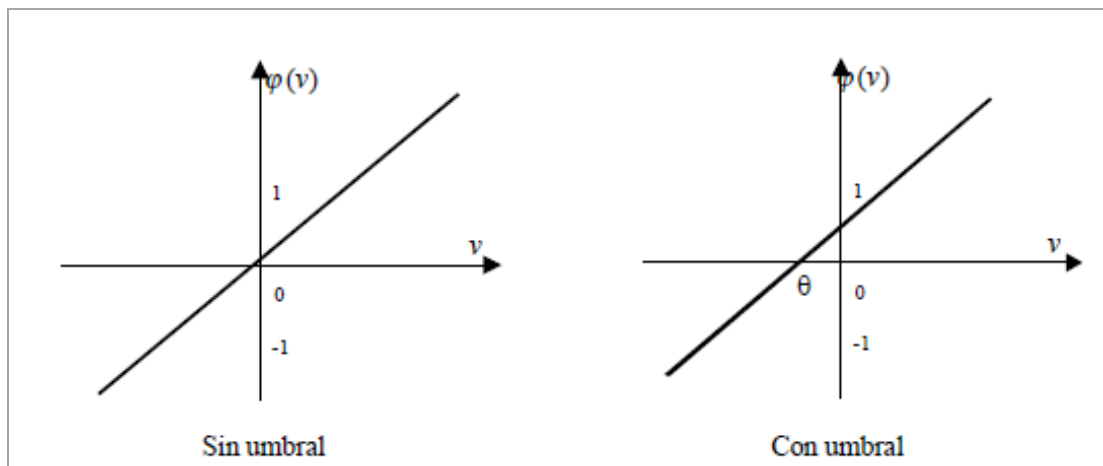


Figura 2. 32. Función lineal

Fuente: [7]

La tabla 2.2 muestra un listado de algunas de las funciones de activación más utilizadas en los distintos modelos de redes neuronales artificiales.

Tabla 2. 2

Funciones de activación

Función	Formula	Rango
Identidad	$y = x$	$[-\infty, \infty]$
Escalón	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[0, 1]$
	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1 & \text{si } x > 1 \\ -1 & \text{si } x < -1 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Sigmoidea	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, 1]$
	$y = \tanh(x)$	$[-1, 1]$
Sinusoidal	$y = \text{Sen}(\omega \cdot x + \varphi)$	$[-1, 1]$

Fuente: [8]

2.5.6. Arquitectura de Redes Neuronales Artificiales [8]

Los diferentes tipos de interconexión implican diferentes comportamientos de la red. Por ejemplo, las redes que tienen flujo de datos unidireccional (feedforward) son estáticas, es decir, producen sólo un grupo de valores de salida en lugar de una secuencia de valores de salida para una entrada dada, además sus salidas no dependen de los valores anteriores de la red. Por otro lado las redes neuronales recurrentes o realimentadas son sistemas dinámicos.

Según la arquitectura de la conexión las redes neuronales se pueden clasificar, entre otras, como: Red Neuronal Monocapa, Red Neuronal Multicapa y Red Neuronal Realimentada.

a) Red Neuronal Monocapa.-

Las redes monocapa están formadas sólo por una capa de neuronas como se ve en la figura 2.33, y suelen utilizarse frecuentemente en tareas relacionadas con la regeneración de información incompleta o distorsionada que se presenta a la red.

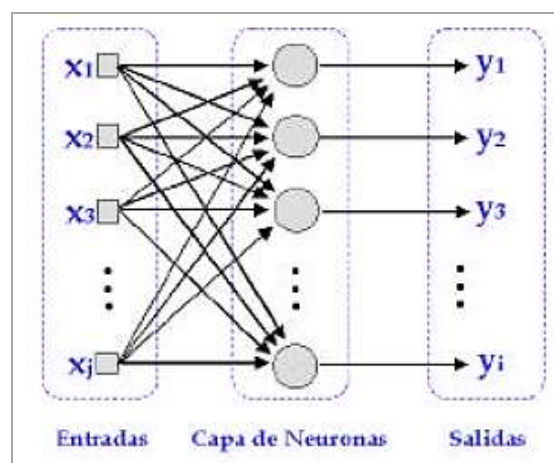


Figura 2. 33. Red Neuronal Monocapa

Fuente: [8]

b) Red Neuronal Multicapa.

Son las estructuras más comunes; como se puede apreciar en la figura 2.34, además de la capas de entrada y salida, poseen un número de capas intermedias u ocultas que mejoran su desempeño.

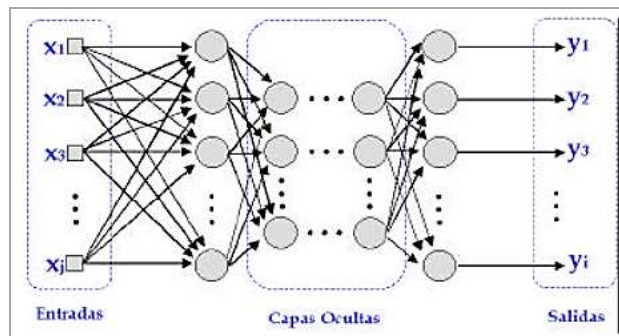


Figura 2. 34. Red Neuronal Multicapa

Fuente: [8]

c) Red Neuronal Realimentada.-

Se caracteriza porque sus salidas pueden ser utilizadas como entradas como se muestra en la figura 2.35. La estabilidad de la red es un importante factor a considerar en este tipo de arquitectura.

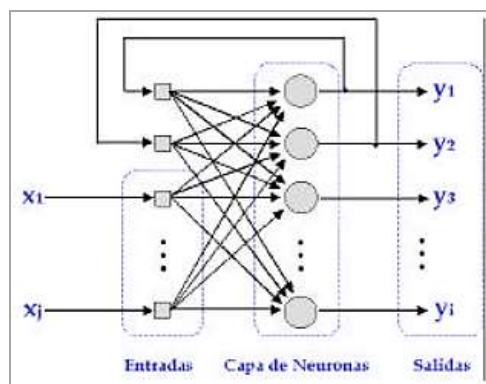


Figura 2. 35. Red Neuronal Multicapa

Fuente: [8]

d) Red de Hopfield

Algunas de las arquitecturas de redes neuronales caracterizan por el hecho de que algunas de sus entradas están realimentadas por salidas de la propia red neuronal. La red propuesta por Hopfield es un ejemplo de estas arquitecturas incluyendo su propio modelo de neurona, como se presenta en la sección anterior. La figura 2.36 ilustra un esquema de una de las posibles combinaciones de redes Hopfield.

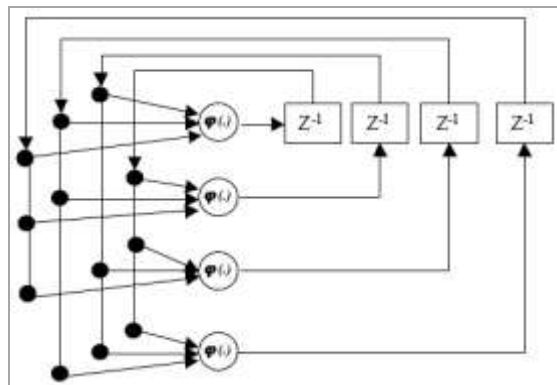


Figura 2. 36. Red neuronal de Hopfield.

Fuente: [8]

e) Red Backpropagation (Rumelhart, 1986).

La falta de métodos de entrenamiento adecuados para los perceptrones multicapa hizo que declinara el interés por las redes neuronales hacia las décadas de los 60-70.

La figura 2.37 ilustra un esquema de una red backpropagation, se interconectan varios elementos de proceso en capas, donde las neuronas de cada capa están conectadas entre sí. Cada neurona de una capa proporciona una entrada a cada una de las neuronas de la siguiente capa.

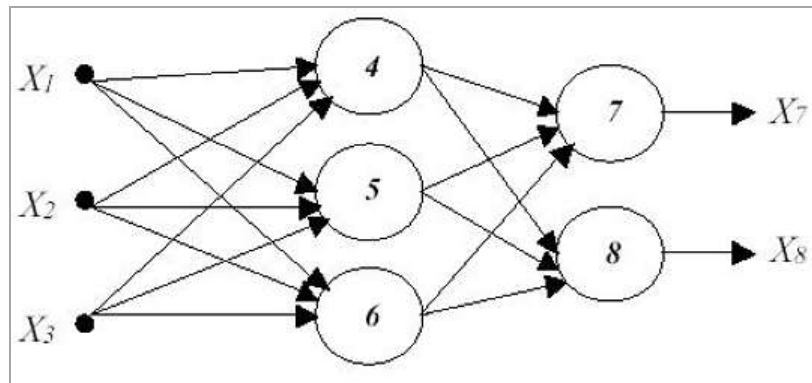


Figura 2. 37. Red neuronal de Hopfield.

Fuente: [8]

El método de entrenamiento por *backpropagation* consiste en:

- **Pasada hacia delante (forward pass):** Se calculan las salidas, y el error a partir de las mismas.
- **Pasada hacia atrás (backward pass):** Se usa el error para alterar los pesos de la capa de salida. El error en las neuronas de las capas ocultas se calcula por propagación hacia atrás del error en la capa de salida, y se ajustan convenientemente los pesos en las capas ocultas.

f) Red Kohonen.

Se basa en la capacidad del cerebro humano según la cual éste forma mapas característicos de la información recibida del exterior. Contiene sólo una capa de salida y otra de entrada de neuronas, que se ramifica para todos los nodos. Red competitiva o mapa de autoorganización ⇒ aprendizaje no supervisado.

Cada neurona de entrada está conectada a todas las de salida.

Como entrada reciben datos continuos normalizados, y la red clasifica los patrones en grupos de características similares, de forma que cada grupo activa siempre las mismas salidas, figura 2.38

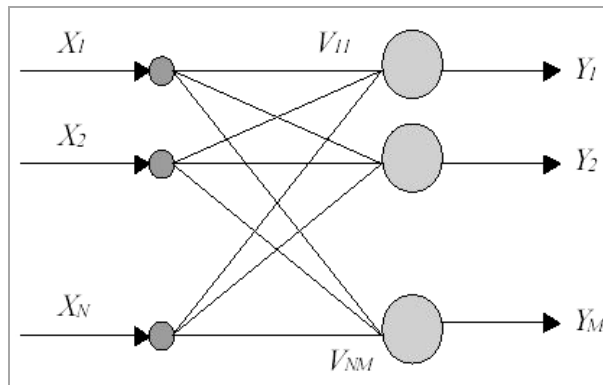


Figura 2. 38. Red neuronal de Hopfield.

Fuente: [8]

2.5.7. Aprendizaje [9]

Durante la operatoria de una red neuronal podemos distinguir claramente dos fases o modos de operación: la fase de aprendizaje o entrenamiento, y la fase de operación o ejecución.

Durante la primera fase, la fase de aprendizaje, la red es entrenada para realizar un determinado tipo de procesamiento. Una vez alcanzado un nivel de entrenamiento adecuado, se pasa a la fase de operación, donde la red es utilizada para llevar a cabo la tarea para la cual fue entrenada.

2.5.8. Fase de entrenamiento.

Una vez seleccionada el tipo de neurona artificial que se utilizará en una red neuronal y determinada su topología es necesario entrenarla para que la red pueda ser utilizada. Partiendo de un conjunto de pesos sinápticos aleatorio, el proceso de aprendizaje busca un conjunto de pesos que permitan a la red desarrollar correctamente una determinada tarea. Durante el proceso de aprendizaje se va refinando iterativamente la solución hasta alcanzar un nivel de operación suficientemente bueno.

El proceso de aprendizaje se puede dividir en tres grandes grupos de acuerdo a sus características:

- Aprendizaje supervisado. Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada junto con la salida esperada. Los pesos se van modificando de manera proporcional al error que se produce entre la salida real de la red y la salida esperada.
- Aprendizaje no supervisado. Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada. No hay información disponible sobre la salida esperada. El proceso de entrenamiento en este caso deberá ajustar sus pesos en base a la correlación existente entre los datos de entrada.
- Aprendizaje por refuerzo. Este tipo de aprendizaje se ubica entre medio de los dos anteriores. Se le presenta a la red un conjunto de patrones de entrada y se le indica a la red si la salida obtenida es o no correcta. Sin embargo, no se le proporciona el valor de la salida esperada. Este tipo de aprendizaje es muy útil en aquellos casos en que se desconoce cuál es la salida exacta que debe proporcionar la red

2.5.9. Fase de operación.

Una vez finalizada la fase de aprendizaje, la red puede ser utilizada para realizar la tarea para la que fue entrenada. Una de las principales ventajas que posee este modelo es que la red aprende la relación existente entre los datos, adquiriendo la capacidad de generalizar conceptos. De esta manera, una red neuronal puede tratar con información que no le fue presentada durante de la fase de entrenamiento.

2.5.10. Redes neuronales con conexión hacia delante

Las redes neuronales artificiales con conexión hacia delante se caracterizan por su organización en capas y conexiones estrictamente hacia delante, utiliza algoritmos de entrenamiento del tipo supervisado.

Este grupo de red es el más utilizado en aplicaciones prácticas que utilicen redes neuronales, obteniéndose muy buenos resultados fundamentalmente como clasificadores de patrones y estimadores de funciones.

Dentro de este grupo de redes neuronales encontramos al perceptrón, la red adaline/madaline, y al perceptrón multicapa.

a) Perceptrón.

Este modelo tiene gran importancia histórica ya que fue el primer modelo en poseer un mecanismo de entrenamiento que permite determinar automáticamente los pesos sinápticos que clasifican correctamente a un conjunto de patrones a partir de un conjunto de ejemplos.

La arquitectura del perceptrón está compuesta por dos capas de neuronas, una de entrada y una de salida. La capa de entrada es la que recibe la información proveniente del exterior y la transmite a las neuronas sin realizar ningún tipo de operación sobre la señal de entrada. En general la información entrante es binaria. La función de activación de las neuronas de un perceptrón es del tipo escalón, dando de esta manera sólo salidas binarias. Cada neurona de salida del perceptrón representa a una clase. Una neurona de salida responde con 1 si el vector de entrada pertenece a la clase a la que representa y responde con 0 en caso contrario.

La operación de un perceptrón con n neuronas de entrada y m neuronas de salidas puede ser resumida de la siguiente manera:

$$y_i(t) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \theta_i\right) \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

(2.5)

El algoritmo de entrenamiento del perceptrón se encuentra dentro de los denominados algoritmos por corrección de errores. Este tipo de algoritmos ajustan los pesos de manera proporcional a la diferencia entre la salida actual proporcionada por la red y la salida objetivo, con el fin de minimizar el error producido por la red.

Se puede demostrar que este método de entrenamiento converge siempre en un tiempo finito y con independencia de los pesos de partida, siempre que la función a representar sea linealmente separable. El principal problema de este método de entrenamiento es que cuando la función a representar no es linealmente separable el proceso de entrenamiento oscilará y nunca alcanzará la solución. Las funciones no separables linealmente no pueden ser representadas por un Perceptrón.

b) Adaline / Madaline

Otro de los modelos que tienen gran importancia es la red neuronal ADALINE. La topología de la red ADALINE es similar a la del perceptrón sólo que en este caso la función de salida de las neuronas es lineal. Dado que las señales de entrada pueden ser continuas, la red ADALINE es un dispositivo de entrada/salida analógica (continua) a diferencia del perceptrón que de acuerdo a lo dicho anteriormente es un dispositivo entrada/salida digital (binaria)

La operación de una red ADALINE con n neuronas de entrada y m neuronas de salidas puede ser resumida de la siguiente manera:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \theta_i \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

(2.6)

Sin embargo, la principal diferencia entre la red ADALINE y el perceptrón consiste en la regla de aprendizaje que utilizan. En el caso de la red ADALINE implementa como método de aprendizaje la regla de Widrow-Hoff, también conocida como regla LMS (Least Mean Squares, mínimos cuadrados), que realiza una actualización continua de los pesos sinápticos de acuerdo a la contribución de cada neurona sobre el error total de la red.

Este método produce un conjunto de pesos sinápticos óptimos desde el punto de vista de los mínimos cuadrados (un conjunto de pesos que minimiza el error cuadrático que comete la red), y en caso de que los vectores de entrada sean linealmente independientes produce una asociación perfecta entre entradas-salidas.

Existe una versión multicapa de la ADALINE denominada MADALINE (Multiple ADALINE, múltiples Adalides) que consiste en una red neuronal con neuronas similares a las de la ADALINE pero que contiene capas de neuronas ocultas.

c) Perceptrón multicapa

El perceptrón multicapa es una extensión del perceptrón simple. La topología de un perceptrón multicapa está definida por un conjunto de capas ocultas, una capa de entrada y una de salida. No existen restricciones sobre la función de activación aunque en general se suelen utilizar funciones sigmoideas.

La operación de un perceptrón multicapa con una única capa oculta puede ser resumida de la siguiente manera:

$$z_k = \sum_j w'_{kj} y_i - \theta'_i = \sum_j w'_{kj} f\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_i\right) - \theta'_i$$

(2.7)

Este modelo es el más utilizado en la actualidad. El espectro de aplicaciones del perceptrón multicapa es muy amplio lo que hace muy difícil enumerar sus aplicaciones más relevantes. Sin embargo, podemos mencionar algunas áreas de aplicación:

- Codificación de información
- Traducción de texto en lenguaje hablado
- Reconocimiento óptico de caracteres (OCR)

La popularidad de este modelo de redes neuronales no se debe únicamente al éxito obtenido en aplicaciones prácticas del mismo. Existen demostraciones teóricas que permiten explicar el éxito de dichas aplicaciones. Se demuestra que un perceptrón multicapa cuya función de activación sea no constante, acotada y monótona creciente es un aproximador universal de funciones. Se llega a un resultado similar utilizando funciones de activación sigmoideas, no necesariamente continuas.

2.6. Aplicaciones actuales de las redes neuronales artificiales

Ante la inmensidad de aplicaciones existentes ya en el mercado, se puede analizar, como una primera muestra resumida y ya bastante atrasada, el estudio llevado a cabo por la Agencia de Proyectos de Investigación.

Las aplicaciones mencionadas comienzan con el ya muy utilizado ecualizador adaptivo para líneas telefónicas, pasando por pequeños reconocedores de letras, hasta clasificadores de sonares. A continuación se mencionarán las principales aplicaciones que aparecen continuamente mencionadas en las más importantes publicaciones, desde 1988 hasta nuestros días, además de las que se mencionan como "posibles", separadas por áreas. [9]

- ✓ **Automóviles.** Sistemas de Piloto automático. Detección de fallas por reconocimiento externo de vibraciones.
- ✓ **Bancos.** Lectura de cheques y otros documentos. Evaluación de aplicaciones de créditos.
- ✓ **Electrónica.** Predicción de secuencia de códigos. Distribución de elementos en Circuitos Integrados. Control de Procesos. Análisis de fallas. Visión Artificial. Reconocimiento de Voz. Modelamiento no-lineal.
- ✓ **Finanzas.** Tasación real de los bienes. Asesoría de préstamos. Previsión en la evolución de precios. Seguimiento de hipotecas. Análisis de uso de Línea de Crédito. Evaluación del riesgo en créditos. Identificación de falsificaciones. Interpretación y reconocimiento de firmas.
- ✓ **Manufactura.** Control de la producción y del proceso. Análisis y diseño de productos. Diagnóstico de fallas en el proceso y maquinarias. Identificación de partículas en tiempo real. Inspección de calidad mediante sistemas visuales. Predicción de calidad del papel. Análisis de mantenimiento de máquinas. Modelamiento dinámico de procesos químicos.
- ✓ **Medicina.** Análisis de células portadoras de cáncer mamario. Análisis de Electroencefalograma y de Electrocardiograma. Reconocimiento de infartos mediante ECG. Diseño de prótesis. Optimización en tiempos de trasplante. Reducción de gastos hospitalarios.
- ✓ **Robótica.** Control dinámico de trayectoria. Robots elevadores. Controladores. Sistemas ópticos.
- ✓ **Seguridad.** Códigos de seguridad adaptivos. Criptografía. Reconocimiento de huellas digitales.
- ✓ **Telecomunicaciones.** Compresión de datos e imágenes. Automatización de servicios de información. Traslación en tiempo real de lenguaje hablado.
- ✓ **Transporte.** Diagnóstico de frenos en camiones. Sistemas de ruteo y seguimiento de flotas.
- ✓ **Voz.** Reconocimiento de voz. Compresión de voz. Clasificación de vocales. Transformación de texto escrito a voz

Algunas ventajas de las RNA frente a otros sistemas de procesamiento de información son:

- ✓ Las RNA pueden sintetizar algoritmos a través de un proceso de aprendizaje.
- ✓ Para utilizar la tecnología neural no es necesario conocer los detalles matemáticos. Sólo se requiere estar familiarizado con los datos del trabajo.
- ✓ La solución de problemas no lineales es uno de los fuertes de las RNA.
- ✓ Las RNA son robustas, pueden fallar algunos elementos de procesamiento pero la red continúa trabajando; esto es contrario a lo que sucede en programación tradicional.

Las desventajas de las redes neurales son:

- ✓ Las RNA se deben entrenar para cada problema. Además, es necesario realizar múltiples pruebas para determinar la arquitectura adecuada. El entrenamiento es largo y puede consumir varias horas de la computadora (CPU).
- ✓ Debido a que las redes se entrenan en lugar de programarlas, éstas necesitan muchos datos.
- ✓ Las RNA representan un aspecto complejo para un observador externo que desee realizar cambios.
- ✓ Para añadir nuevo conocimiento es necesario cambiar las iteraciones entre muchas unidades para que su efecto unificado sintetice este conocimiento. Para un problema de tamaño considerable es imposible hacer esto manualmente, por lo tanto una red con representación distribuida debe emplear algún esquema de aprendizaje.

2.7. Tarjeta de Adquisición de datos Mydaq [10]

La tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ como se muestra en la figura 2.39 es un dispositivo de bajo costo ideal para crear mediciones de entradas analógicas y con funcionalidad para generar niveles de voltaje de salida, un contador ascendente de 32bits, y dos puertos con 8 líneas de entradas y salidas digitales programables.

Esta funcionalidad se puede realizar simultáneamente para solucionar aplicaciones que van desde registradores de datos, adquisición analógica con alarmas, conteo de eventos, hasta control de lazo cerrado. Al usar LabVIEW desarrollar este tipo de aplicaciones es sencillo y además permite la flexibilidad de expandir la funcionalidad.

Esta tarjeta es fabricada por National Instruments, la misma empresa creadora del programa LabView.

2.7.1. Características de las Entradas y Salidas

EA (Entrada Analógica).- Estos terminales se pueden usar como entradas individuales de voltaje analógico o como combinaciones para entradas de voltaje diferencial como nos muestra la tabla 1. Tenemos 8 entradas terminales individuales, las cuales pueden ser usadas de dos formas:

- **Como terminales simples**, en este caso se usa como referencia las salidas GND de la NI myDAQ, el voltaje máximo para esta configuración es de $\pm 10V$.
- **Como terminales de voltaje diferencial**, se usan dos terminales simples. En la Tabla 1 se especifica cuáles son las parejas para usar la configuración como voltaje diferencial, los valores de voltajes que se

pueden utilizar para este tipo de configuración son ± 20 V, ± 10 V, ± 5 V, ± 4 V, ± 2.5 V, ± 2 V, ± 1.25 V, ± 1 V.

- **SA (Salidas Analógicas).**- Son las dos únicas salidas analógicas que posee la tarjeta de adquisición de datos, las cuales no son individuales y se usan junto con la tierra. El rango de voltaje es de 0 a +5V con una impedancia de salida de 50Ω y una corriente de 5mA.
- **GND (Tierra).**- Es la referencia para todas las entradas y salidas analógicas y la referencia para los voltajes diferenciales, así como de todos los voltajes que da la tarjeta NI myDAQ.
- **EP (Entradas Digitales Programables).**- Son todas las entradas y salidas digitales, estas se pueden programar para que funcionen como entrada o salida individualmente, sin depender una de la otra.

En total la tarjeta posee 8 entradas/salidas digitales, todas ellas compatibles con tecnología TTL, LVTTTL, CMOS.

Para nuestros terminales digitales tenemos cuatro opciones posibles de configuración.

En el caso de las salidas:

- Configurarlos como colector abierto.
- Configurarlos como unidad de salida digital de conducción activa.

En caso de las entradas:

- Configurarlos como receptor de señal de voltaje por medio de un switch.
- Configurarlos como receptor de señal TTL.

EPC (Entrada Programable Contador).- Esta entrada podemos programarla para que se use como una entrada para un contador de eventos, o como disparador digital.

Tabla 2. 3

Señales de los terminales de NI myDAQ [12]

NOMBRE DE SEÑAL	REFERENCIA	DIRECCION	DESCRIPCION
AUDIO IN	-----	ENTRADA	ENTRADA DE AUDIO: ENTRADA DE AUDIO ESTEREO EN UN CONECTOR IZQUIERDO Y DERECHO
AUDIO OUT	-----	SALIDA	SALIDA DE AUDIO: SALIDA DE AUDIO ESTEREO EN UN CONECTOR IZQUIERDO Y DERECHO
VOLTAJE : + 15 V / - 15 V	AGND	SALIDA	+15V / - 15V FUENTES DE ALIMENTACION
AGND	-----	-----	TIERRA ANALOGICA: TERMINAL DE REFERENCIA PARA AI; AO ; + 15V Y -15V
AI 0+ / AI 0 - AI 1+ / AI 1-	AGND	SALIDA	SALIDAS ANALOGICAS CANALES DE 0 Y 1
AI 1+ / AI 1-	AGND	ENTRADA	ENTRADAS ANALOGICAS CANALES DE 0 Y 1
DIO (0...7)	DGND	ENTRADA O SALIDA	SEÑALES DIGITALES I/O: LINEAS DE PROPOSITO GENERAL O UNA SEÑAL DIGITAL DE LOS CONTADORES
DGND	-----	-----	LINEAS DE REFERENCIA PARA LA ALIMENTACION DE DIO Y 5V
5V	AGND	SALIDA	FUENTE DE ALIMENTACION DE 5V

Fuente: [10]

2.8. Labview 2014 [11]

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico que utiliza íconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones.

Los programas de LabVIEW se denominan instrumentos virtuales o VI, debido a que su apariencia y operación imita a los instrumentos físicos, tales como osciloscopios, multímetros, etc. LabVIEW contiene un número comprensible de herramientas para adquisición, análisis, despliegue, y

almacenamiento de datos, así como herramientas que le ayudan a resolver su código de ejecución.

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario, o panel frontal, con controles e indicadores. Los controles son texto, botones de acción, perillas, y otros dispositivos de entrada. Los indicadores son gráficas, LED, y otros despliegues. Después de que se ha construido su interfaz se le agrega código utilizando los VI y estructuras para controlar los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques es quien contiene este código.

2.8.1. Funcionamiento del Software

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs. Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

Utilizando LabVIEW se pueden crear instrumentos de medida y prueba, aplicaciones de adquisición de datos, Controlar instrumentos, análisis de medidas, aplicaciones de generación de reportes, etc.

2.8.2. Panel frontal

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario, o panel frontal con controles e indicadores. Los controles pueden ser texto, botones de acción, interruptores y otros dispositivos de entrada. Los indicadores son gráficos, led, objetos para mostrar texto o números y otros elementos.

El panel frontal es utilizado para interactuar con el usuario cuando el programa está corriendo. Usuarios pueden controlar el programa, cambiar entradas, y ver datos actualizados en tiempo real. Los controles son usados como entradas ajustando controles de deslizamiento para colocar un valor de alarma, encendiendo o apagando un switch, o parando un programa. Los indicadores son usados como salidas. Termómetros, luces, y otros indicadores indican valores del programa. Esto puede incluir datos, estados de programa y otra información.

En la figura 2.40, el switch de poder (encendido o apagado) es un control booleano. Un valor booleano contiene ambos un valor verdadero o falso. El valor es falso hasta que el switch se presiona. Cuando el switch se presiona, el valor se convierte en verdadero. El indicador del historial de temperatura es una gráfica de forma de onda. Esta muestra valores múltiples. En este caso, la gráfica señalará °F versus tiempo (seg.).

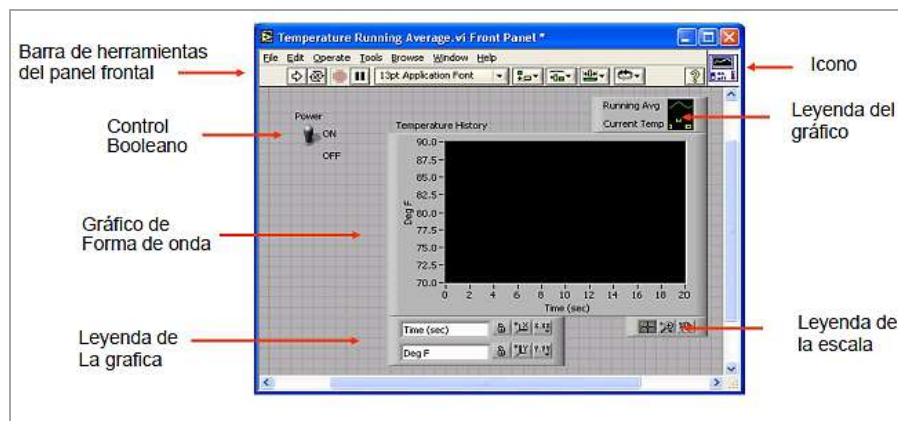


Figura 2. 40. Panel frontal

Fuente: [11]

2.8.3. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques figura 2.41 constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora Labview. En el lenguaje G las funciones y las estructuras son nodos elementales. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

El diagrama de bloques se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos. Labview posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case, etc.)

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

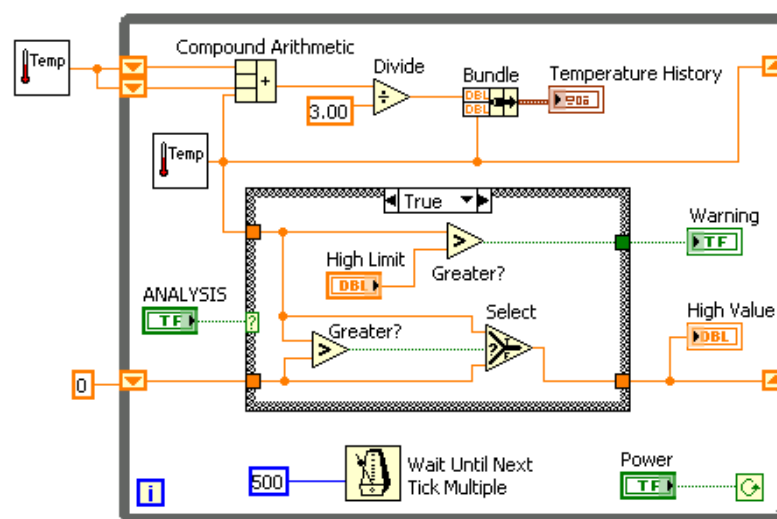


Figura 2. 41. Interfaz gráfica del diagrama de bloques

Fuente: [11]

2.8.4. Paletas

En la figura 2.42, las paletas de Labview proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques. Existen las siguientes paletas:



Figura 2. 42. Tools palette

Fuente: [11]

2.8.5. Paleta de Controles

En la figura 2.43, la paleta de controles (Controls), contiene todos los controles e indicadores que se emplearán para crear la interfaz del VI con el usuario.

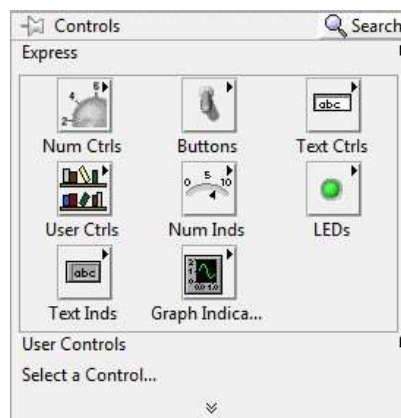


Figura 2. 43. Paleta de controles - Express.

Fuente: [11]

2.8.6. Paleta de Funciones

En la figura 2.44, la paleta de funciones (Functions), para construir un diagrama de bloques. La paleta de funciones contiene todos los objetos que se emplean en la implementación del programa del VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a fichero, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa.

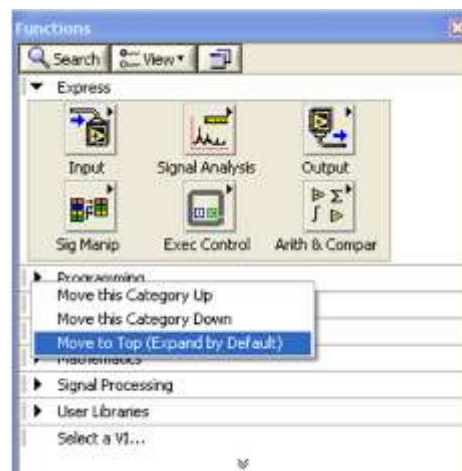


Figura 2. 44. Paleta de funciones

Fuente: [11]

2.8.7. Paleta de Herramientas

En la figura 2.45, para operar y modificar objetos en el panel frontal y en el diagrama de bloques. Si la herramienta de selección automática está habilitada y se mueve el cursor sobre un objeto en el panel frontal o en el diagrama de bloque, LabVIEW automáticamente selecciona la herramienta correspondiente de la paleta de controles.



Figura 2. 45. Paleta de herramientas.

Fuente: [11]

2.8.8. Programación en LabVIEW

Con el entorno gráfico de programación de LabVIEW se comienza a programar a partir del panel frontal. En primer lugar se definen y seleccionan de la paleta de controles todos los controles (entradas que dará el usuario) e indicadores (salidas que presentará en pantalla el VI) que se emplearán para introducir los datos por parte del usuario y presentar en pantalla los resultados.

Una vez colocados en la ventana correspondiente al panel frontal todos los objetos necesarios, debe pasarse a la ventana Block Diagram (menú Windows > Show Block Diagram), que es donde se realiza la programación propiamente dicha (diagrama de bloques). Al abrir esta ventana, en ella se encuentran los terminales correspondientes a los objetos situados en el panel frontal, dispuestos automáticamente por LabVIEW.

Se deben ir situando las funciones, estructuras, etc. que se requieran para el desarrollo del programa, las cuales se unen a los terminales mediante cables. Para facilitar la tarea de conexión de todos los terminales, en el menú "Help" puede elegirse la opción "Show Help", con lo que al colocar el cursor sobre un elemento aparece una ventana con información relativa a éste (parámetros de entrada y salida).

2.8.9. Creando un VI

Cuando se crea un objeto en el panel frontal, una terminal es creada en el diagrama de bloques. Estas terminales dan acceso a los objetos del panel frontal del código creado mediante el diagrama de bloques.

En general, las terminales anaranjadas deben unirse (cablearse) con las terminales anaranjadas, verdes con verdes, y así sucesivamente. Esta no es una regla que no se puede romper; por ejemplo LabVIEW permitirá al usuario conectar una terminal azul (valor entero) a una terminal anaranjada (valor fraccional). Pero en la mayoría de casos, se recomienda buscar una igualdad en colores. Los controles tienen una flecha en el lado derecho y tienen un borde grueso.

Los indicadores tienen una flecha en el lado izquierdo y un borde fino. Las reglas lógicas pueden ser aplicadas al conectar en LabVIEW: Cada cable debe tener una (pero solo una) fuente (o control), y cada cable puede tener varios destinos (o indicadores).

2.9. Ejecución de un VI

Una vez que se ha concluido la programación del VI se procede a su ejecución. Para ello la ventana activa debe ser el panel frontal (si se está en la ventana del diagrama de bloques, se debe seleccionar la opción Show Panel del menú Windows).

Una vez situados en el panel frontal, se pulsará el botón de Run, situado en la barra de herramientas (figura 2.46) y el programa empezará a ejecutarse.

Si se desea una ejecución continua, se pulsará el botón situado a la derecha del de Run (Continuous Run). Si durante el funcionamiento continuo

del programa se vuelve a pulsar el citado botón, se finalizará la última ejecución del mismo, tras lo cual el programa se detendrá.

Para finalizar la ejecución de un programa se puede operar de dos formas. La primera, y la más aconsejable, es emplear un botón en el panel frontal del VI, cuya pulsación produzca la interrupción del bucle de ejecución de la aplicación. La segunda forma de detener la ejecución del VI es pulsando el botón de pausa o el de stop.

La diferencia entre ambos es que si se pulsa stop, la ejecución del programa finaliza inmediatamente, mientras que si se pulsa pausa, se produce una detención en el funcionamiento del programa, retomándose su ejecución una vez se vuelve a pulsar el mismo botón.

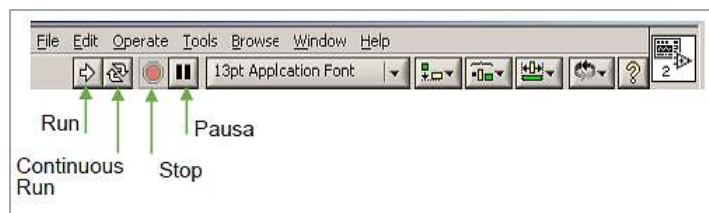


Figura 2. 46. Barra de herramientas

Fuente: [11]

2.9.1 Estructuras

Las instrucciones de control permiten a un programa ejecutar un código de forma condicional o repetirlo cierto número de veces.

En LabVIEW estas instrucciones son estructuras que encierran en su interior el código al que afectan. Éstas controlan el flujo del programa, bien sea mediante la secuenciación de acciones, ejecución de bucles, etc., como se muestra en la figura 2.47.

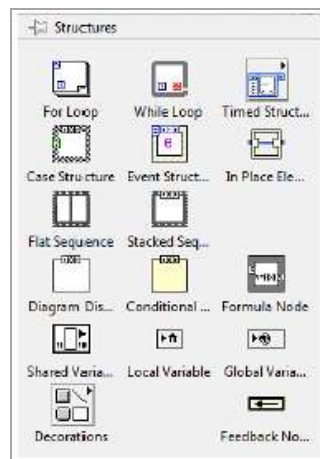


Figura 2. 47. Estructuras.

Fuente: [11]

2.9.2. Aplicación de LabVIEW en sistemas de adquisición de datos

Las aplicaciones en LabVIEW son implementadas en muchas industrias alrededor del mundo incluyendo la automotriz, telecomunicaciones, aeroespacial, semiconductores, diseño y producción de electrónica, control de procesos, biomedicina y muchas otras. Las aplicaciones involucran todas las fases del desarrollo del producto desde la investigación para el diseño hasta producción y servicio. Usando LabVIEW a lo largo de una organización, se puede ahorrar tiempo y dinero compartiendo información y software.

Con LabVIEW se puede automatizar medidas desde varios dispositivos, analizar datos en paralelo con adquisición y crear reportes personalizados.

2.9.3 Ventajas de usar LabVIEW para automatizar sistemas de pruebas

LabVIEW ofrece una incomparable integración con hardware de adquisición de datos de NI (National Instruments) y de terceros, bibliotecas de procesamiento de señales y controles de interfaz de usuario construidos con propósitos específicos para visualización de datos de medidas.

LabVIEW ayuda a desarrollar sistemas más rápidos, automatizar múltiples medidas y tomar decisiones basadas en datos adquiridos.

LabVIEW en sistemas de adquisición de datos posee una variedad de plantillas, asistentes y herramientas fáciles de usar para adquisición, configuración, depuración y calibración, donde se puede obtener en minutos los resultados de medidas que se necesita.

2.10. Matlab [12]

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con **vectores** y **matrices**. Como caso particular puede también trabajar con números escalares tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Una de las capacidades más atractiva es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.

MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio. Este manual hace referencia a la versión 7.0 de este programa (también llamada release 14), aparecida a mediados de 2004.

MATLAB es un gran programa de cálculo técnico y científico. Para ciertas operaciones es muy rápido, cuando puede ejecutar sus funciones en código nativo con los tamaños más adecuados para aprovechar sus capacidades de vectorización. En otras aplicaciones resulta bastante más lento que el código equivalente desarrollado en C/C++ o Fortran. En la versión 6.5, MATLAB incorporó un acelerador JIT (Just In Time), que mejoraba significativamente la velocidad de ejecución de los ficheros *.m en ciertas circunstancias, por ejemplo cuando no se hacen llamadas a otros ficheros *.m, no se utilizan estructuras y clases, etc. Aunque limitado en ese momento, cuando era aplicable mejoraba sensiblemente la velocidad, haciendo innecesarias ciertas técnicas utilizadas en versiones anteriores

como la vectorización de los algoritmos. En cualquier caso, el lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, como ya se ha dicho, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo.

MATLAB es una herramienta para la computación técnica, cálculo y visualización en un entorno integrado, por ejemplo:

- Matemáticas y computación.
- Algoritmo desarrollo.
- Adquisición de datos.
- Modelado, simulación y creación de prototipos.
- Análisis de los datos, la exploración y visualización de gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones, incluyendo la construcción de la interfaz gráfica de usuario.

MATLAB se puede arrancar como cualquier otra aplicación de **Windows**, clicando dos veces en el icono correspondiente en el escritorio o por medio del menú Inicio). Al arrancar MATLAB se abre una ventana similar a la mostrada en la Figura 2.48. Ésta es la vista que se obtiene eligiendo la opción **Desktop Layout/Default**, en el menú **View**. Como esta configuración puede ser cambiada fácilmente por el usuario, es posible que en muchos casos concretos lo que aparezca sea muy diferente. En cualquier caso, una vista similar se puede conseguir con el citado comando **View/Desktop Layout/ Default**. Esta ventana inicial requiere unas primeras explicaciones.

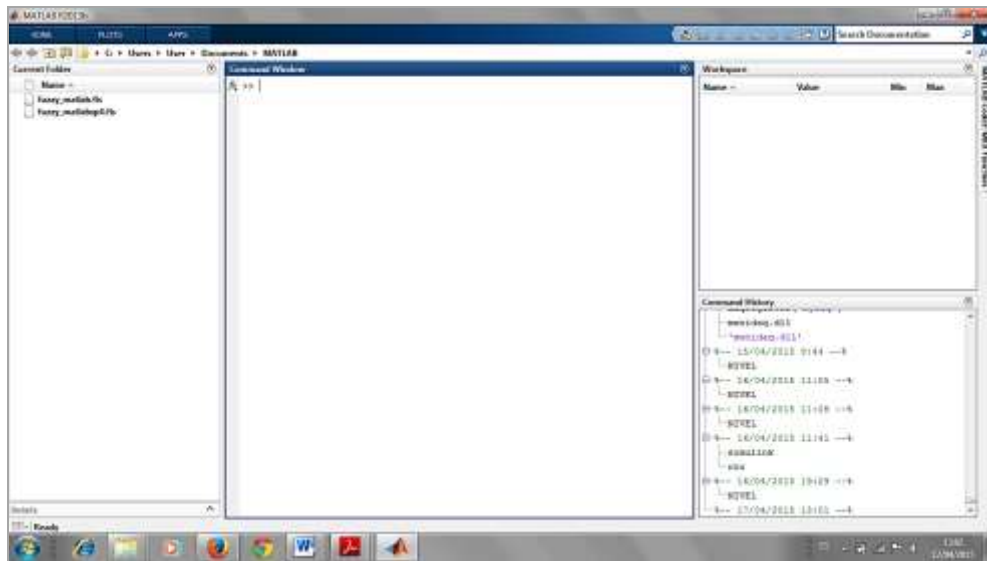


Figura 2. 48. Ventana inicial de Matlab.

Fuente: [12]

2.10.1. Simulink

Simulink, fue desarrollado por The MathWorks, es una herramienta comercial para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Su interfaz principal es una herramienta gráfica de diagramas de bloques y un conjunto personalizable de bibliotecas de bloques.

Ofrece una estrecha integración con el resto del entorno MATLAB y puede conducir cualquier MATLAB o ser con guión de él. Simulink se utiliza ampliamente en la teoría de control y procesamiento de señales digitales para la simulación y el diseño como se observa en la figura 2.49.

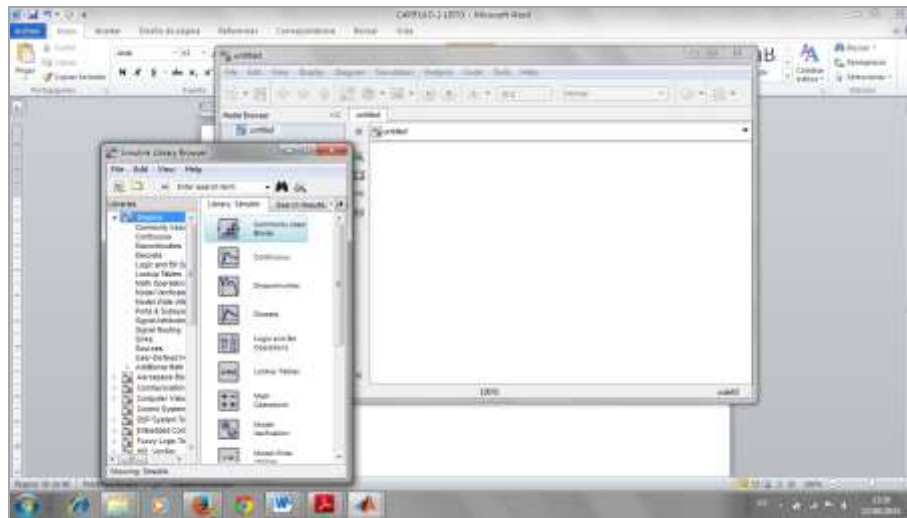


Figura 2. 49. Ventana inicial del Simulink.

Fuente: [12]

2.11. Sistema de bombeo

Existe variedad de mecanismos de bombeo (bombas), cuya capacidad, diseño y aplicación cubren un amplio rango que va desde pequeñas unidades utilizadas para dosificación de cantidades mínimas, hasta bombas centrifugas que son capaces de manejar grandes volúmenes para surtir de agua a las grandes concentraciones urbanas.

2.11.1. Bombas de agua

Es un dispositivo empleado para elevar, transferir o comprimir líquidos y gases, en definitiva son máquinas que realizan un trabajo para mantener un líquido en movimiento. Consiguiendo así aumentar la presión o energía cinética del fluido.

2.11.2. Tipos de bombas [13]

a. Bombas centrífugas

Consisten en un rodete montado sobre una carcasa o voluta (fig. 2.50). El líquido entra en el centro del rodete y es acelerado por el giro de este, la energía cinética del fluido se transforma en energía potencial en la salida.

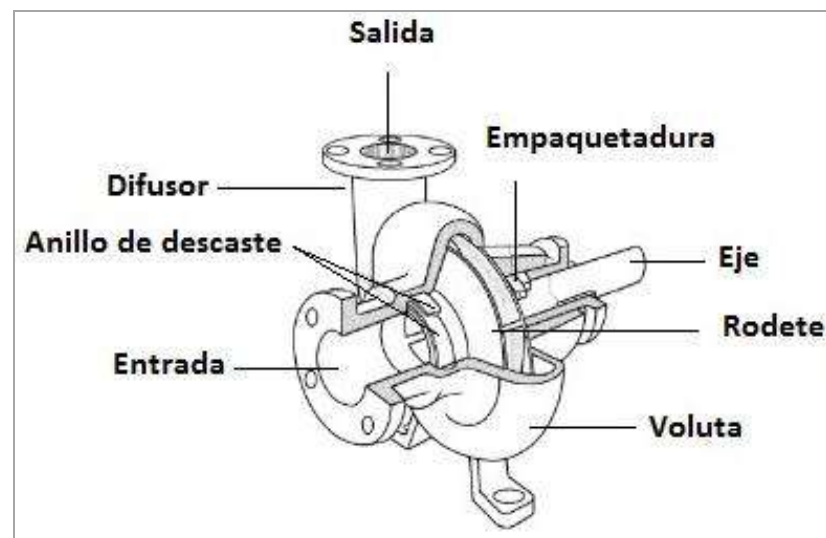


Figura 2. 50. Bomba centrífuga

Fuente: [13]

Es encargada de producir energía cinética, que proviene de una fuerza centrífuga, para convertirse parcialmente en energía de presión con las características siguientes:

- La descarga es relativamente constante y libre de pulsaciones de presión.
- El diseño mecánico permite manejar grandes capacidades.
- Ofrece una operación eficiente en un gran rango de presiones y capacidades.
- La presión de descarga es función de la densidad del fluido.

Las bombas centrífugas, debido a sus características, son las más aplicables en la industria, las razones de estas preferencias son las siguientes:

- Los mecanismos de acoplamiento son muy sencillos.
- La impulsión eléctrica del motor que la mueve es bastante sencilla.
- Para una operación definida, el gasto es constante y no se requiere dispositivo regulador.

Aparte de las ventajas ya enumeradas, se unen las siguientes ventajas económicas:

- El costo económico es menor en comparación con otros tipos.
- El espacio requerido es aproximadamente menor a otro tipo de bomba.
- El peso es muy pequeño y por lo tanto las cimentaciones también lo son.
- Menor número de elementos a cambiar y a realizar mantenimiento.

b. Bombas alternativas

Las bombas alternativas se utilizan para caudales de bajos a moderados, con elevadas alturas manométricas. Consisten fundamentalmente en un pistón y un cilindro, con las apropiadas válvulas de aspiración y descarga. Se pueden utilizar pistones simples, dobles, triples o pistones de doble acción. Poseen motores de velocidad variable o sistemas de recirculación para regular el caudal. Tienen una válvula de seguridad para protección ante una válvula cerrada en descarga.

Se distinguen tres tipos de bombas alternativas:

- De potencia (fig. 2.51).
- De volumen controlado.
- De corriente.

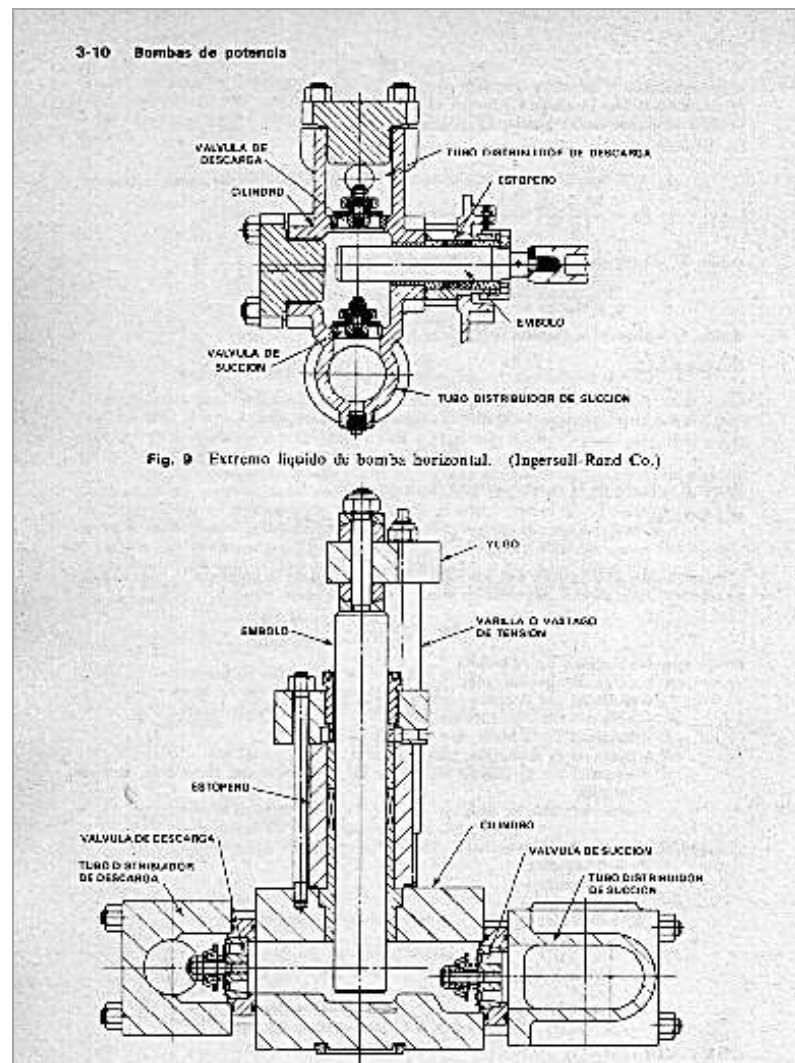


Figura 2. 51. Bomba alternativa de potencia

Fuente: [13]

a. Bombas de diafragma

Las bombas de diafragma (fig. 2.52) utilizan paredes elásticas (membranas o diafragmas) en combinación con válvulas de retención (check) para introducir y sacar fluido de una cámara de bombeo, este tipo de bombas manejan una amplia variedad de fluidos, incluyendo químicos, polvos secos, aditivos para alimentos, gomas, pinturas, productos farmacéuticos, lodos, aguas servidas y fluidos altamente corrosivos.

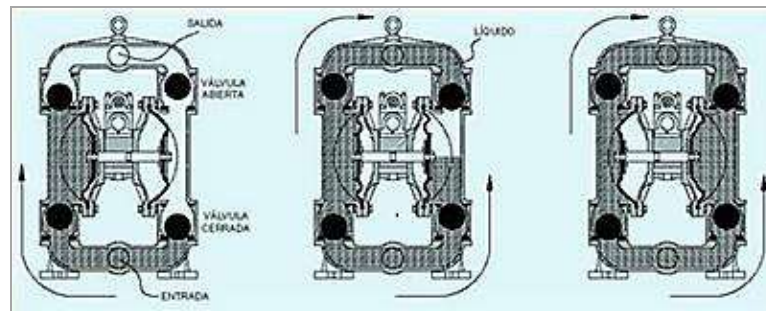


Figura 2. 52. Bomba de Diafragma

Fuente: [13]

b. Bombas rotativas

Son bombas que están provistas de elementos rotativos que comprimen el fluido en el interior de una carcasa proporcionando un caudal sin pulsaciones, los tipos de bombas rotativas son:

- Bombas de engranajes externos (fig. 2.53).
- Bombas de engranajes internos.
- Bombas de rotor lobular.
- Bombas de paletas (deslizantes, oscilantes, flexibles).
- Bombas de husillo simple (estator flexible).
- Bombas de husillo doble.
- Bombas de anillo líquido.

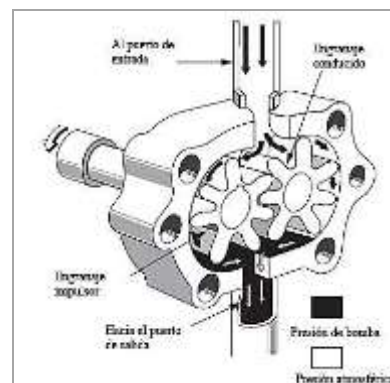


Figura 2.51 Bomba Rotativa de Engranajes Externos

Fuente: [13]

2.11.3. Selección de bombas hidráulica

Tal vez, el mayor problema con que se encuentra un ingeniero, al diseñar un sistema de bombeo, es la elección de la clase, tipo, capacidad, columna y detalles de la bomba o bombas que habrán de usarse en un sistema. Existe variedad de bombas útiles y tantas aplicaciones posibles para cada una de ellas, que generalmente es difícil reducir el grupo de elección a una unidad específica.

Esta sección de la tesis, tiene como objetivo, reducir muchas de las dificultades que se encuentran al seleccionar una bomba. En primer lugar el profesional valorará las condiciones hidráulicas que deberá poseer la bomba; posteriormente se tomará en cuenta las condiciones del líquido; después usando un análisis económico, se podrá llegar a la unidad más económica y adecuada para su planta.

Análisis de algunos elementos de considerar en la elección de una bomba

Composición del líquido: es fundamental en la elección de los materiales que forman las distintas partes de la bomba y que están en contacto con el líquido. Es decir que mientras más exacta sea la información sobre la composición del líquido que se bombea, más precisa será la elección de los materiales que constituyen la estructura de la bomba, así como las guarniciones y el eventual sellado mecánico.

- **Funcionamiento en seco.-** se aconseja siempre proteger la bomba del funcionamiento en seco. Uno de los modos más usados, es siempre la aplicación en el pozo de un *nivel de mínimo* que interrumpa el funcionamiento de la bomba apenas llega al nivel peligroso para la misma bomba.

- **Temperaturas de ejercicio** es importante conocer la temperatura máxima y mínima (además de la temperatura normal de ejercicio). La temperatura del fluido en movimiento actúa con efectos importantes sobre los materiales: temperaturas muy bajas pueden volver frágil una determinada materia plástica, mientras que temperaturas elevadas pueden crear fenómenos de ablandamiento y deformación de las partes constructivas.

Se debe procurar que la bomba pueda aspirar en una zona del recipiente o del pozo donde el líquido presente buenas características.

Las bombas se eligen generalmente por uno de tres métodos.

- El cliente suministra detalles completos a uno o más fabricantes, de las condiciones de bombeo y pide una recomendación y oferta de las unidades que parezcan más apropiadas para la aplicación.
- El comprador efectúa un cálculo completo del sistema de bombeo procediendo luego a elegir la unidad más adecuada de catálogos y gráficas de características.
- Se usa una combinación de estos dos métodos para llegar a la selección final.

Los datos esenciales requeridos por cualquier fabricante de bombas antes de que pueda preparar una recomendación y una oferta. Muchos fabricantes tienen formas que puede llenar el ingeniero sin pedir una recomendación. Éstos pueden ser sumamente útiles debido a que ayudan a evitar la omisión de datos importantes. Los datos que se deben entregar son:

Naturaleza del líquido a bombearse:

a) Es el líquido

- ¿Agua fresca o salada, acida o alcalina, aceite, gasolina, lodo o pulpa de papel?
- Frio o caliente; y si es caliente ¿a qué temperatura? ¿Cuál es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo?
- ¿Cuál es su densidad?
- ¿Limpio y libre de materias extrañas o sucias y abrasivo? En este último caso, ¿cuál es el tamaño y naturaleza de los sólidos y son éstos abrasivos? Si el líquido es de naturaleza pulposa ¿cuál es la consistencia, expresada ya sea en porcentaje o en kg/m³ de líquido? ¿Cuál es el material en suspensión? ¿Cuál es el análisis químico. No. pH, etc.?

b) Capacidad:

- ¿Cuál es la capacidad requerida así como la cantidad máxima y mínima, de líquido que habrá de desarrollar la bomba?

c) Condición de succión:

Existe:

- ¿Una elevación de succión?
- ¿O una columna de succión?
- ¿Cuál es la longitud y el diámetro del tubo de succión?

d) Condición de descarga

- ¿Cuál es la columna estática? ¿Es constante o variable?

- ¿Cuál es la columna de fricción?
- ¿Cuál es la presión de descarga máxima contra la que habrá de trabajar la bomba?

e) Columna total

- Variaciones en los puntos 4 y 5 causará variaciones en la columna total.
- ¿Es el servicio continuo o intermitente?
- ¿Qué tipo de potencia se tiene disponible para mover la bomba y cuáles son las características de ésta?
- ¿Qué limitaciones de espacio, peso o transporte habrán de encontrarse?

f) Localización de instalación.

- Localización geográfica.
- Elevación sobre el nivel del mar.
- Instalación interior o a la intemperie.
- Variación de las temperaturas ambientes.

2.11.4. Factores que intervienen en la en la eficiencia de una bomba

Para mantener, o controlar la eficiencia, podemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Selección del equipo de bombeo (motor- bomba) apropiado.
- Acabado de la superficie de los impulsores.
- Selección adecuada de la velocidad específica de succión.
- Control de líquidos viscosos.
- Control de concentraciones de grandes volúmenes de sólidos.
- Control del tamaño de sólidos.
- Control de fricción en cojinetes, empaques o sellos.
- Montaje apropiado del equipo (bomba- motor).

- Corregir desbalances.
- Reducir vibraciones.
- Alineación del equipo en forma programada.
- Controlar la temperatura de operación del motor.
- Evitar recortes de impulsores.
- Controlar la velocidad del equipo.
- Controlar la presión del fluido.
- Evitar tensiones mecánicas en tuberías.
- Reposición de grasa adecuada.
- Verificar el cebado de bomba y tubería
- Evitar entrada de aire.
- Cambiar sellos.
- Controlar el abatimiento del nivel dinámico.
- Control del peso específico del fluido que impulsa la bomba.
- Nivelación de la flecha.
- Verificar presión de succión y descarga.

2.11.5. Sistema con elevación estática de succión [14]

La elevación estática de succión es la distancia vertical, en metros, desde el nivel de suministro de líquido al eje central de la bomba, encontrándose la bomba arriba del nivel de suministro (fig. 2.52).

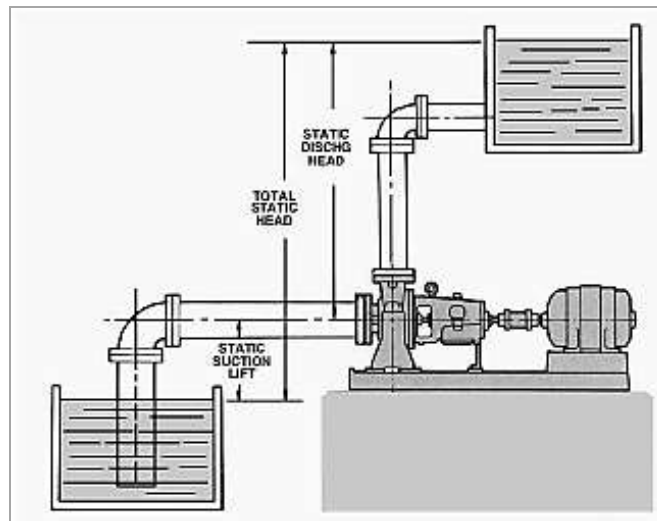


Figura 2. 53. Elevación Estática de Succión

Fuente: [14]

Dónde:

h_{ed} = Columna o altura estática de descarga.

h_{es} = Elevación o altura de succión estática.

H_{eT} = Columna o altura estática total.

Columna o altura estática de descarga es la distancia vertical, en metros, del eje central de la bomba al punto de entrega libre del líquido.

Las pérdidas de altura en la entrada y salida del fluido al sistema son pérdidas debido a la velocidad del flujo en el sistema de tubería de succión y de descarga.

Columna o altura de fricción, se mide en metros de líquido, y es la columna equivalente necesaria para vencer la resistencia de las tuberías, válvulas y accesorios del sistema de bombeo.

Dependiendo de la naturaleza de la instalación de bombeo, la columna de velocidad puede o no ser un factor importante en la columna total de la bomba (figura 2.53).

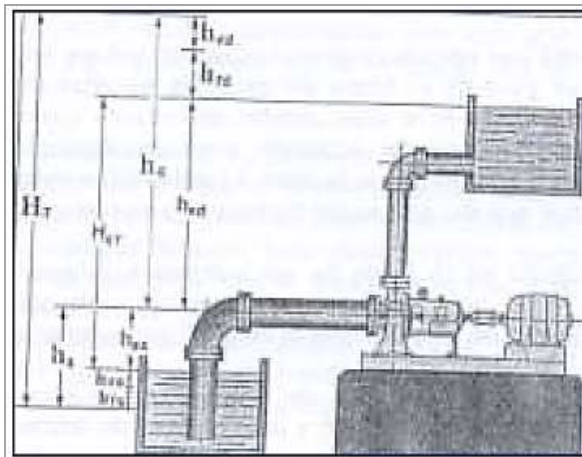


Figura 2.53 Columna o Altura Dinámica

Fuente: [14]

Columna o altura total (o altura dinámica total), es la suma de las columnas de elevación de succión y de descarga figuras (2.52 y 2.53). Cuando hay una columna de succión, la columna total de la bomba es la diferencia entre las columnas de descarga y de succión.

2.11.6 Ecuaciones Fundamentales [13]

➤ Altura útil efectiva H.

$$H = h_d + h_s \quad (m)$$

(2.8)

- Cabeza dinámica de descarga

$$h_d = h_{ed} + h_{vd} + H_{rd} \pm h_{pmd}$$

(2.9)

Dónde:

- Cabeza o columna estática h_{sd}

$$h_{ed} \quad (m)$$

(2.10)

- Cabeza o columna de velocidad h_{vd}

$$h_{vd} = \frac{v_d^2}{2g} \quad (m)$$

(2.11)

- Pérdidas de energía primaria y secundaria H_{rd}

$$H_{rd} = H_{rpd} + H_{rsd}$$

(2.12)

$$H_{rd} = \left[\lambda \frac{L_d}{D_i} + \Sigma k \right] \frac{v_d^2}{2g} \quad (m)$$

(2.13)

Dónde:

λ = coeficiente de fricción

L_d =longitud de tubería en la succión (m).

D_i =diámetro interno (m).

Σk =coeficiente de pérdidas.

V_d =velocidad en la descarga (m/s).

g =gravedad (9,8m2/s).

- Cabeza o columna de presión H_{pmd}

$$h_{pmd} \quad (m)$$

(2.14)

$$h_s = -h_{es} + h_{vs} + H_{rs} \pm h_{pm}$$

(2.15)

Dónde:

- Cabeza o columna estática h_{es}

$$h_{es}(m)$$

(2.16)

- Cabeza o columna de velocidad h_{vs}

$$h_{vs} = \frac{v_s^2}{2g} \quad (m) \quad (2.17)$$

Pérdidas de energía primaria y secundaria:

$$H_{rs} = H_{rps} + H_{rss} \quad (2.18)$$

$$H_{rs} = \left[\lambda \frac{L_s}{D_i} + \Sigma k \right] \frac{v_s^2}{2g} \quad (m) \quad (2.19)$$

Dónde:

λ = coeficiente de fricción.

L_s =longitud de tubería en la succión (m).

D_i =diámetro interno (m).

Σk =coeficiente de pérdidas.

v_s =velocidad en la succión (m/s).

g =gravedad ($9,8m^2/s$).

- Cabeza o columna de presión h_{pms}

$$h_{pms}(m) \quad (2.20)$$

➤ Cantidad de Energía Disponible en el Sistema

- Cabeza estática de succión

Abierto:

$$NPSH)_d = \frac{P_b}{\gamma} + h_{es} - H_{rs} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (m. c. a) \quad (2.21)$$

Cerrado:

$$(NPSH)_d = \pm \frac{P_i}{\gamma} + h_{es} - H_{rs} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (m.c.a)$$

(2.22)

Dónde:

$\frac{P_b}{\gamma}$ = Presión Barométrica

$\frac{P_v}{\gamma}$ = Presión del Vapor del Líquido

➤ **Caudal**

$$Q = A * V$$

(2.23)

Dónde:

Área:

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (m^2)$$

(2.24)

➤ **Número de Reynolds**

$$Re = \frac{VD}{\mu}$$

(2.25)

Dónde:

V= velocidad (m/s).

Di= diámetro interno (m).

μ = viscosidad cinemática (m^2/s)

➤ **Rugosidad Relativa**

$$k = \frac{\varepsilon}{D}$$

(2.26)

ε = rugosidad absoluta depende de tipo de tubería.

➤ **Factor de Fricción**

- *Flujo laminar*

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

(2.27)

- *Flujo turbulento*

$$\lambda = f(Re, k)$$

(2.28)

➤ **Potencia**

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta}$$

(2.29)

Dónde:

γ = peso específico del agua (kg/m³).

η = eficiencia.

H=altura útil efectiva (m).

Q=caudal (m³/s).

2.12. Sensor

Definición.

Un sensor es cualquier dispositivo que detecta una determinada acción externa. Los sensores existen desde siempre, porque el hombre los tiene incluidos en su cuerpo y de diferentes tipos.

2.12.1 Tipos de sensores

- **Sensores Pasivos.-** Los sensores pasivos si requieren de esta alimentación para poder efectuar su función.
- **Sensores Activos.-** Los sensores activos generan la señal de salida sin la necesidad de una fuente de alimentación externa.

Según el tipo de magnitud física a detectar:

- 1. Medición de temperatura:** Pirómetro óptico, Pirómetro de radiación, Termistor, Termopar.
- 2. Medición de esfuerzos y deformaciones:** Medición de movimiento de grandes distancias se usa: Radar, láser, Ultrasonido, etc. Distancias pequeñas: Métodos ópticos, Métodos inductivos (LDT y VDT), Métodos resistivos y capacitivos. Posición lineal o angular: Codificadores incrementales, Codificadores absolutos, Transductores capacitivos.
- 3. Sensores de Presencia o Proximidad:** Inductivos, Capacitivos, Fotoeléctricos, De efecto Hall, Radiación, Infrarrojos.
- 4. Sistemas de visión artificial:** Cámaras CCD.
- 5. Sensores de humedad y punto de rocío:** Humedad en aire-gases, Humedad en sólidos, Punto de rocío.
- 6. Sensores de caudal:** De sólidos, líquidos o gases, Presión diferencial, Medidores magnéticos, Medidores por fuerzas de Coriolis, Medidores de área variable, Medidores de desplazamiento positivo.
- 7. Sensores de nivel:** De líquidos y sólidos. Sensores de presión.
- 8. Sensores de Fuerza y par:** Calibrador de tensión, De array táctil.
- 9. Sensores de intensidad lumínica.**
- 10. Sensores de aceleración.**
- 11. Sensores de velocidad lineal o angular.**
- 12. Sensores táctiles.**

2.13. Tuberías y accesorios [15]

A medida el agua fluye por tuberías, codos, válvulas y otros dispositivos, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción interna del material con el fluido, estas pérdidas de energía traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema. En base al análisis y a la distribución del sistema hidráulico a diseñarse y posteriormente a construirse se escogió la tubería y accesorios de PVC (cloruro de polivinil) roscable de alta presión.

El diseño de una tubería se basa en ciertas normas de diseños estandarizadas, investigadores, ingenieros de proyectos e ingenieros de campo en áreas de aplicación específicas.

Las discrepancias de estas normas se relacionan con las condiciones de diseño, el cálculo de los esfuerzos y los factores admisibles. Es importante destacar también, los principios fundamentales del mantenimiento de tuberías, punto más importante a tener en cuenta en cualquier proceso industrial.

Los tubos y tuberías en el mercado se clasifican en:

Tubos metálicos ferrosos

- Hierro dulce
- Acero inoxidable
- Duroiron

Tubos metálicos no ferrosos

- Aluminio
- Aleaciones de cobre-latón y bronce

- Estaño
- Magnesio

Tubos para servicios especiales

- Vidrio
- Cemento
- Hormigón
- PVC

2.14. Accesorios

Accesorios para tuberías. Es el conjunto de piezas moldeadas o mecanizadas que unidas a los tubos mediante un procedimiento determinado forman las líneas estructurales de tuberías de una planta de proceso.

Tipos accesorios:

Entre los tipos de accesorios más comunes se puede mencionar:

- Bridas
- Codos
- Tes
- Reducciones
- Cuellos o acoples
- Válvulas
- Empacaduras
- Tornillos y niples

Bridas.- Son accesorios para conectar tuberías con equipos (Bombas, intercambiadores de calor, calderas, tanques, etc.) o accesorios (codos, válvulas, etc.).

La unión se hace por medio de dos bridas, en la cual una de ellas pertenece a la tubería y la otra al equipo o accesorio a ser conectado.

La ventaja de las uniones bridadas radica en el hecho de que por estar unidas por espárragos, permite el rápido montaje y desmontaje a objeto de realizar reparaciones o mantenimiento.

Codos.- Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías.

Tipos de Codos:

- **Codos estándar de 45°:** Para unir caños de un mismo diámetro a 45° (figura. 2.54)



Figura 2. 54. Codo Estándar de 45°

Fuente: [15]

- **Codos estándar de 90°:** Para unir caños de un mismo diámetro a 90° (figura. 2.55)



Figura 2. 55. Codo Estándar de 90°

Fuente: [15]

- **Codos estándar de 180°**

Características:

Diámetro: Es el tamaño o medida del orificio del codo entre sus paredes los cuales existen desde ¼" hasta 120". También existen codos de reducción.

Angulo: Es la existente entre ambos extremos del codo y sus grados dependen del giro o desplazamiento que requiera la línea.

Radio: Es la dimensión que va desde el vértice hacia uno de sus arcos. Según sus radios los codos pueden ser: radio corto, largo, de retorno y extra largo.

Espesores: una normativa o codificación del fabricante determinada por el grosor de la pared del codo.

Aleación: Es el tipo de material o mezcla de materiales con el cual se elabora el codo, entre los más importantes se encuentran: acero al carbono, acero a % de cromo, acero inoxidable, galvanizado, etc.

Dimensión: Es la medida del centro al extremo o cara del codo y la misma puede calcularse mediante fórmulas existentes.

- **Tes.-** Son accesorios que se fabrican de diferentes tipos de materiales, aleaciones, diámetros y schedule y se utiliza para efectuar fabricación en líneas de tubería (figura. 2.56).



Figura 2. 56. Te Normal

Fuente: [15]

Tipos:

Diámetros iguales o te de recta. Reductora con dos orificios de igual diámetro y uno desigual.

Características:

Diámetro: Las tes existen en diámetros desde ¼" hasta 72" en el tipo Fabricación.

Espesor: Este factor depende del espesor del tubo o accesorio a la cual va instalada y ellos existen desde el espesor fabricación hasta el doble extra pesado.

Aleación: Las más usadas en la fabricación son: acero al carbono, acero inoxidable, galvanizado, etc.

Juntas: Para instalar las tes en líneas de tubería se puede hacer, mediante procedimiento de rosca embutible-soldable o soldable a tope.

Dimensión: Es la medida del centro a cualquiera de las bocas de la te.

- **Reducción**

Son accesorios de forma cónica, fabricadas de diversos materiales y aleaciones. Se utilizan para disminuir el volumen del fluido a través de las líneas de tuberías. Para conectar cañerías de diferentes diámetros (figura.2.57)



Figura 2. 57. Reducción

Fuente: [15]

Tipos:

- **Estándar concéntrica:** Es un accesorio reductor que se utiliza para disminuir el caudal del fluido aumentando su velocidad, manteniendo su eje.
- **Estándar excéntrica:** Es un accesorio reductor que se utiliza para disminuir el caudal del fluido en la línea aumentando su velocidad perdiendo su eje.

Características:

Diámetro: Es la medida del accesorio o diámetro nominal mediante el cual se identifica al mismo, y varía desde $\frac{1}{4}$ " x $\frac{3}{8}$ " hasta diámetros mayores.

Espesor: Representa el grosor de las paredes de la reducción va a depender de los tubos o accesorios a la cual va a ser instalada. Existen desde el espesor estándar hasta el doble extra pesado.

Aleación: Es la mezcla utilizada en la fabricación de reducciones, siendo las más usuales: al carbono, acero al % de cromo, acero inoxidable, etc.

Junta: Es el tipo de instalación a través de juntas roscables, embutibles soldables y soldables a tope.

Dimensión: Es la medida de boca a boca de la reducción Concéntrica y excéntrica.

2.15. Válvulas [13]

Definición

Son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Es un elemento final de lazo de control que interrumpe o deja pasar el fluido según la señal correctora que le llegue desde el controlador. Lo más común en procesos es que la manipulación sea un caudal (fig.2.58)

Las válvulas son unos de los instrumentos de control más esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos.

Sus tamaños van desde una fracción de pulgada hasta 30 ft (9 m) o más de diámetro.

Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta más de 20000 lb/in² (140MPA) y temperaturas desde las criogénicas hasta 1500. F (815C). En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia



Figura 2. 58. Ejemplo de Válvula

Fuente: [13]

2.15.1. Tipos de Válvulas:

El tipo de válvula dependerá de la función que debe efectuar, se clasifican en: válvulas de cierre o bloqueo, válvulas de estrangulamiento y válvulas de retención o de flujo inverso, válvulas de control de presión y otras válvulas para funciones especiales tales como dirigir , servicio de muestreo, cerrar salidas de recipientes o tanques, Etc.

- **Válvulas de bloqueo.-** Son dispositivos cuya misión es la de bloquear cuando sea necesario, el flujo de fluidos de alimentación o escape en tuberías o equipos de procesos. Dentro de este grupo están las siguientes válvulas:

- ✓ De compuerta (figura. 2.59)
- ✓ De macho.
- ✓ De bola.
- ✓ De mariposa.
- ✓ De ángulo.
- ✓ De tipo Y.

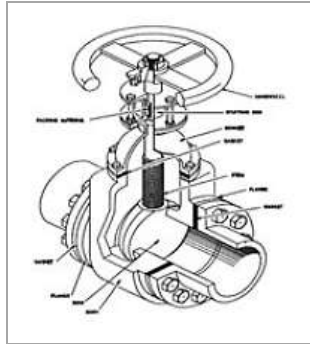


Figura 2. 59. Válvula de Compuerta

Fuente: [13]

- **Válvulas de estrangulamiento.**- Estas válvulas permiten regular el paso de un fluido en función de los requerimientos del proceso. Las más comunes son:

- ✓ De globo.
- ✓ De aguja.
- ✓ En Y.
- ✓ De ángulo.
- ✓ De mariposa. (figura. 2.60)



Figura 2. 60. Válvula de Mariposa

Fuente: [13]

- **Válvulas de retención (check).**- Son aquellas que no permiten el flujo inverso, actúan de manera automática entre los cambios de presión para evitar que se invierta el flujo. La presión del fluido circulante abre la

válvula; el peso del mecanismo de retención y cualquier inversión en el flujo la cierran. Existen diferentes tipos, y su selección depende de la temperatura, caída de presión que producen y la limpieza del fluido. Están disponibles en los siguientes tipos:

- ✓ Bisagra.
- ✓ Disco inclinable
- ✓ Elevación (disco, pistón o bola) (figura. 2.61).
- ✓ De pie.



Figura 2. 61. Válvula Tipo Bola

Fuente: [13]

- **Válvulas de control o desahogo de presión.-** Se utilizan cuando se requiere el desahogo o descarga de la presión cuando esta exceda la que se puede controlar. Dependiendo del servicio que realizan se les denomina:

- ✓ De desahogo.
- ✓ De seguridad.(figura. 2.62)
- ✓ De seguridad convencional.
- ✓ De desahogo equilibrado.
- ✓ De purga.



Figura 2. 62. Válvula de Seguridad

Fuente: [13]

2.16. Variadores de velocidad

Definición.

Los variadores de velocidad son dispositivos que permiten variar la velocidad de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables [16]

2.16.1. Composición de un variador de velocidad

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

- **Etapa Rectificadora:** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc. Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores.
- **Etapa Intermedia:** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia. Los

fabricantes que utilizan bobinas en la línea en lugar del circuito intermedio, pero tienen la desventaja de ocupar más espacio y disminuir la eficiencia del variador.

- **Etapa del Inversor:** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobre tensión, baja tensión cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc. El Inversor o Inverter convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables. Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor.
- **Etapa de Control:** Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general. La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16 kHz.

Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor (Figura 2.63).

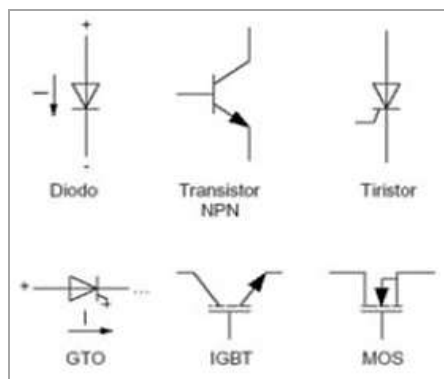


Figura 2. 63. Componentes de potencia para la etapa de control

Fuente: [18]

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia), estén aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control. Figura 2.64.

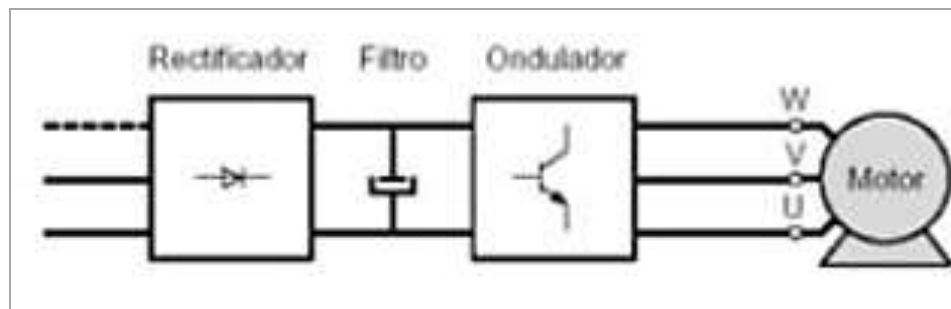


Figura 2. 64. Esquema de principio de un convertidor de frecuencia

Fuente: [18]

2.18.2. Características generales de un variador de velocidad

1. Puede utilizarse con cualquier motor de corriente alterna trifásica, incluyendo motores antiexplosivos, químicos, encapsulados, de dos velocidades, moto reductora, asincrónica o sincrónica, etc.
2. Protección electrónica del motor, del equipo y de la máquina. Sobrecarga, cortocircuito del motor, puesta a tierra del motor, baja tensión, sobretensión y sobre temperatura.
3. Libre de escobillas, colectores, carbones, poleas, correas, embragues, llaves de conmutación o elementos de protección mecánicos o eléctricos con desgastes.
4. Aceleración y desaceleración ajustables.
5. Inversión de marcha dinámica.
6. Posibilidad de accionar múltiples motores.
7. Diseñados para trabajo continuo, 24 horas por día en cualquier tipo de industria.
8. Comando remoto a cualquier distancia del motor en forma manual, automatizada o mediante una central computarizada.

9. Modulación vectorial.
- 10.Reducida cantidad de funciones, fácil de programar.
- 11.Entradas programables.

2.18.3. Tipos de control de velocidad

- **Control Escalar**

Un controlador de velocidad de un motor de corriente alterna convencional, alimenta al motor de inducción con un voltaje y una frecuencia controlados. Esto produce un campo magnético rotativo (flujo) en el motor, lo que hace que el rotor gire a una velocidad ligeramente inferior a la velocidad de rotación del campo. Este tipo de variadores es conocido como voltaje variable, frecuencia variable o controlador escalar.

Aunque este es un excelente método de control de velocidad para motores de inducción, existen limitaciones en términos de respuesta dinámica, para operaciones a baja velocidad y capacidad de control del par.

- **Control Vectorial**

El campo rotativo del estator en los motores de inducción, produce una corriente entre las barras del rotor del motor, el cual ajusta a cambio el flujo del rotor. La interacción de flujos del estator y el rotor produce un par rotacional. Mediante el control de la magnitud y fases de las corrientes de entrada del motor, los componentes que producen el flujo y el par de estas corrientes pueden ser controlados con total exactitud, logrando así un control rápido y preciso sobre el par resultante. Este proceso es conocido como control de orientación del campo, o simplemente control vectorial.

2.18.4. Aplicaciones

Los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas:

- 1. Transportadoras** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.
- 2. Bombas y ventiladores centrífugos** Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.
- 3. Bombas de desplazamiento positivo** Control de caudal y dosificación con precisión, controlando la velocidad. Por ejemplo en bombas de tornillo, bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro, etc.
- 4. Ascensores y elevadores** Para arranque y parada suaves manteniendo la cupla del motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.
- 5. Extrusoras** Se obtiene una gran variación de velocidades y control total de la cupla del motor.
- 6. Centrifugas** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.
- 7. Prensas mecánicas y balancines** Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.
- 8. Máquinas textiles** Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo random para conseguir telas especiales.
- 9. Compresores de aire** Se obtienen arranques suaves con máxima cupla y menor consumo de energía en el arranque.

10. Pozos petrolíferos Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.

2.18.5. Protecciones del variador de velocidad

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación), un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo. Además los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:

1. Los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra.
2. Las sobretensiones y las caídas de tensión.
3. Los desequilibrios de fases.
4. El funcionamiento en monofásico.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO

El sistema de entrenamiento consiste en el control de nivel de un líquido en un tanque por medio de un controlador inteligente diseñado con las herramientas de LabVIEW. El controlador inteligente está diseñado para ejecutarse en un computador mediante el uso de herramientas del software de LabVIEW.

El tanque 1 es alimentado a través de una bomba centrífuga, la cual está conectada a un variador de velocidad que a su vez permite variar el caudal que esta bomba entrega al tanque. La medición del nivel del líquido en el tanque es realizada a través de un sensor de ultrasonido. La señal emitida por este sensor es acondicionada por un circuito y procesada en el controlador creado en el software LabVIEW. El controlador al recibir la señal de medición del nivel, compara el valor de esta señal con los valores establecidos por el usuario, realiza la operación de control necesaria de acuerdo al resultado obtenido por la comparación y envía la señal de control hacia los actuadores de la planta.

Los actuadores de la planta están conformados por la combinación del variador de velocidad y la bomba es así que el controlador actúa directamente sobre una entrada de control del variador de velocidad para de este modo variar el caudal que entrega al tanque y por consiguiente el nivel del líquido de los mismos.

Las perturbaciones del sistema, que sirven para observar la capacidad de respuesta de la planta están a cargo de variador y la válvula de bola que simulan el caudal de consumo al tanque. Variando la apertura de estos actuadores, logramos perturbar el sistema y observar la respuesta del mismo.

Para el montaje de la planta de control de nivel, se diseñó una estructura metálica, que cuenta con dos tanques, el primero es un cilindro (Tanque 1), que se encuentra en la parte superior, el cual posee un sensor de nivel para determinar la altura del líquido, un desfogue hacia el depósito (Tanque 2) de reserva mediante una válvula de bola ubicada respectivamente en el tanque, en la parte inferior cuenta con un soporte de madera (MDF), con un compartimiento la una parte para el tanque de reserva, y la otra para la bomba. La figura 3.1 muestra la idea inicial del sistema de entrenamiento.

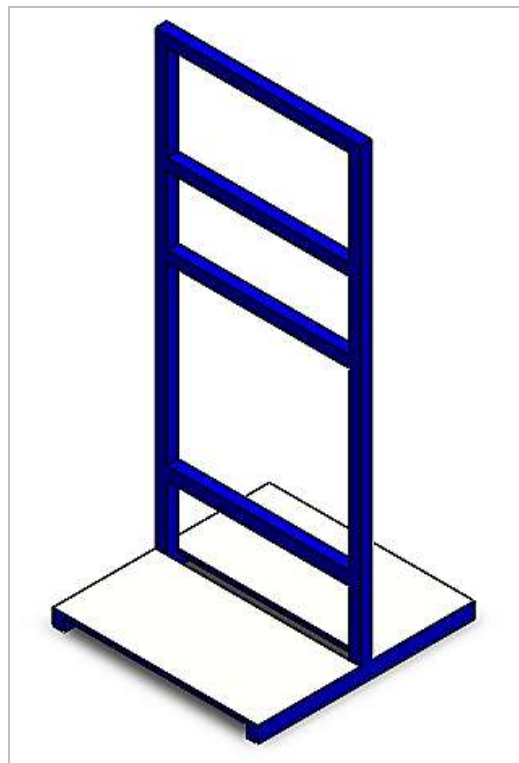


Figura 3. 1. Sistema de Entrenamiento

3.1. Modelamiento

3.1.1. Modelo de Depósito Simple [17]

Es importante conocer las matemáticas que involucran estos sistemas de control. La figura 3.2 muestra un sistema de depósito simple.

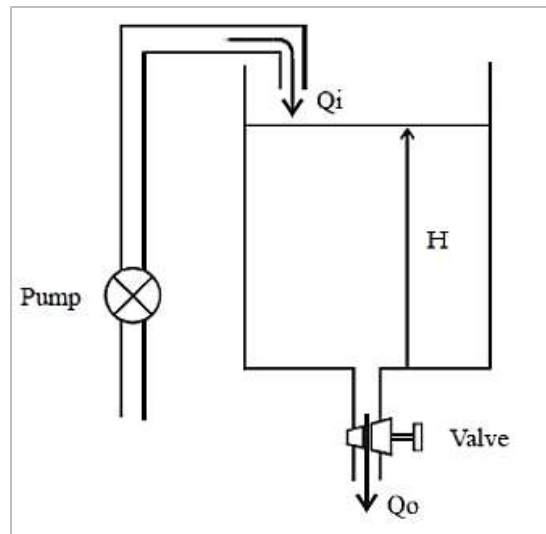


Figura 3. 2. Sistema de Nivel con un solo Tanque

Fuente: [1]

El modelo del sistema está determinado para relacionar el flujo Q_i que entra al primer tanque con el flujo Q_o , que sale del tanque hacia el tanque de reserva. Usando la ecuación de equilibrio de flujo dentro del tanque se tiene (ecuación 3.1):

$$Q_i - Q_o = A \frac{dH}{dt} \quad (3.1)$$

Donde A es el área transversal del tanque y H es la altura del fluido.

Si la válvula es diseñada para comportarse como un orificio, entonces el fluido que pasa la válvula será relacionado con el nivel de fluido en el tanque, H , por la expresión 3.2:

$$Q_o = C_d a \sqrt{2gH} \quad (3.2)$$

En esta ecuación a es el área transversal del orificio, (en la práctica, el área transversal será dada por las dimensiones de la válvula y el canal de flujo en el cual está montado). C_d es llamado el coeficiente de descarga de la válvula. Este coeficiente toma en cuenta todas las características del

fluido, pérdida e irregularidades en el sistema. Y $g = \text{cte. Gravitacional} = 980 \text{ cm/sec}^2$.

La ecuación 3.2 toma a Cd como una constante por lo que Q_o tiene una relación no lineal con el nivel H para todas las posibles condiciones de operación.

Idealmente, la relación no lineal está definida por la ecuación 3.2, pero en una válvula real hay una ecuación no lineal más compleja. Combinando las ecuaciones 3.1 y 3.2 se tiene la ecuación 3.3 que describe el modelo del sistema:

$$A \frac{dH}{dt} + C_d a \sqrt{2gH} = Q_i$$

(3.3)

La ecuación 3.3 describe el modelo del sistema, es una ecuación diferencial y es una ecuación de primer orden que relaciona el nivel de flujo de entrada, Q_i , con el nivel de salida del agua, H . Para diseñar un controlador lineal para el nivel del tanque, se debe linealizar la ecuación considerando pequeñas variaciones h cerca del nivel normal de operación del fluido en el tanque (ecuación 3.4):

$$H = H_0 + h$$

(3.4)

Donde H_0 es el nivel normal de operación, y es una constante, h es un pequeño cambio cercano a ese nivel. Para pequeñas variaciones de h cercanas a H_0 podemos aproximar la función no lineal mediante la tangente de H_0 . Esto permite una ecuación diferencial lineal (ecuación 3.5):

$$T \frac{dh}{dt} + h = g \cdot q_i$$

(3.5)

Donde q_i es la variación en el flujo de entrada Q_i , necesitado para mantener el nivel de operación H_o . La constante de tiempo T y la ganancia g son función de los parámetros y niveles de operación

3.2. Diseño mecánico

El diseño mecánico es el resultado de investigaciones sobre el límite de fluencia de los materiales, valor de esfuerzo aplicado en el que el material comienza a deformarse permanentemente, adquiriendo propiedades diferentes a las que tenía antes de someterlo a una fuerza. El proceso de diseño inicia con la identificación de la necesidad, para luego plantear el problema concreto, también se realiza de manera interactiva el análisis y síntesis hasta concluir con el diseño final. Es decir en este caso debemos empezar por describir cada pieza que es parte del módulo:

3.2.1. Estructura de apoyo metálica.

3.2.2. Estructura de madera.

3.2.3. Cuba de recepción.

3.2.4. Tuberías y Válvulas.

3.2.5. Bomba centrífuga.

3.2.6. Variador de Velocidad.

3.2.1. Estructura de apoyo metálica

La estructura del sistema de entrenamiento tiene la función de sostener todo el módulo. Sirve de soporte para los tanques (Tanque 1 y Tanque 2), sensor de distancia. El soporte horizontal inferior sirve para sostener al tanque de reserva (Tanque 2), bomba y los dos soportes intermedios sirve

para sostener al tanque (Tanque 1) y el soporte superior sirve para la ubicación del sensor de distancia (figura 3.3)

Es por eso que se ha escogido un tubo cuadrangular de 2" de lado por 1,5 mm de espesor lo que proporcionará al sistema el soporte y peso adecuados necesarios para el sistema en el ANEXO A se detallan las características del tubo cuadrangular, en las figuras 3.4 y 3.5 se observa las dimensiones de la estructura.

Procedimiento de Cálculo

Para comenzar con estos cálculos se necesita tomar en consideración el peso de cada elemento montado en la estructura Tabla 3.1

Tabla 3. 1

Listado de pesos de los elementos que posaran en la estructura

CANTIDAD	DENOMINACIÓN	PESO (Kg)	PESO TOTAL
1	Bomba	14	14
1	Variador de Velocidad	1.20	1.20
1	Tanque (TanK1) de cilindro	12.87	12.87
1	Tanque (TanK2) de reserva	70.5	70.5
1	Plancha de madera (MDF)	12.6	12.6
1	Tarjeta My DAQ (National Instrument)	0.1	0.1
1	Módulos de Protección del sistema.	1.4	1.4

El peso total de los elementos nos da: 112.67Kg.

$$M_T = 112.67 \text{ Kg}$$

$$W_T = m * g$$

$$W_T = 112.67 \text{ Kg} * 9.8 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 1104.16 \text{ N}$$

$$W_T = 1104.16 \text{ N}$$



Figura 3. 3. Estructura Metálica del Sistema.

En la vista lateral de la estructura (figura 3.5) se aprecia que su forma es tipo L, con el objetivo de que a un lado se ubique el tanque (Tank2) de reserva y al otro lado la bomba.

La pintura será electrostática color azul para evitar la oxidación y deterioro de la estructura metálica.

Tomando en cuenta las dimensiones del tanque (Tank1), tanque de reserva (Tank2), distancia del sensor al tanque (Tank1) se diseñó una estructura la misma que se muestra con dimensiones en las figuras 3.4 y 3.5.

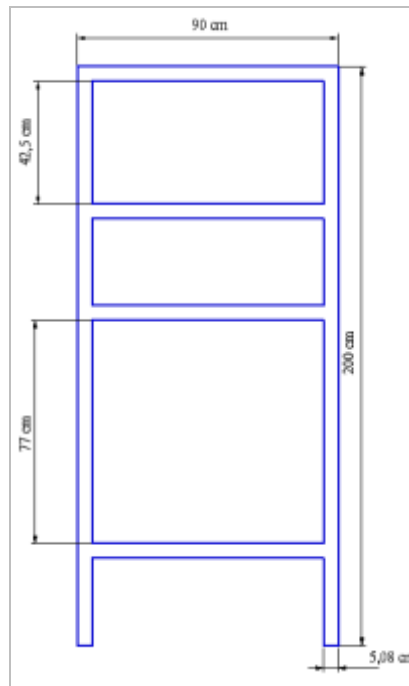


Figura 3. 4. Vista Frontal Estructura Metálica.

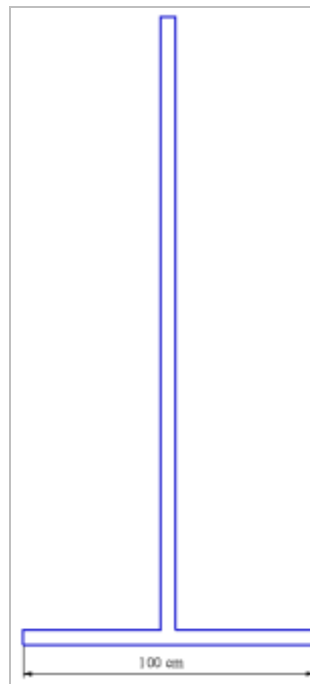


Figura 3. 5. Vista Lateral Izquierda Estructura Metálica.

3.2.2. Estructura de madera

El tanque (Tank2) de reserva y la bomba se apoyaran en una plancha de madera, la cual será seleccionada de acuerdo al peso que soportará esto se diseña en el peor de los casos, o sea con el tanque totalmente lleno, lo que se hará es determinar el peso total sobre la plancha de madera. (Figura 3.6)

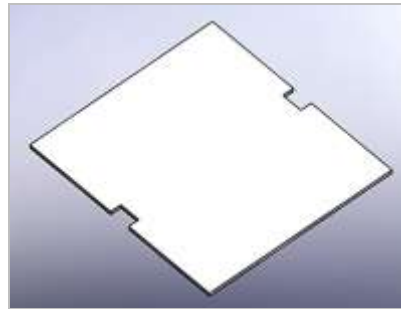


Figura 3. 6. Apoyo de Madera (MDF)

$$V = \frac{m}{\delta}$$

(3.6)

Dónde:

V = Volumen del recipiente

m =Masa del Acrílico

ρ =Densidad del agua

En este caso los datos que tenemos son los siguientes:

$$V = \pi * r^2 * h$$

(3.7)

$$V = \pi * (7,5cm)^2 * (70cm)$$

$$V = 12370,05 \text{ cm}^3$$

$$V = 12,37 \text{ lt}$$

$$m_{\text{acrilico}} = 0,5 \text{ kg} ; \rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{lt}}$$

$$m_1 = \frac{V}{\rho}$$

$$m_1 = \frac{12,37 \text{ lt}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{lt}}}$$

$$m_1 = 12,37 \text{ kg}$$

$$m_t = m_1 + 0,5 \text{ kg}$$

$$m_t = 12,37 \text{ kg} + 0,5 \text{ kg}$$

$$m_t = 12,87 \text{ kg}$$

Ahora encontramos el peso del tanque de reserva en newton:

$$W = m * g$$

(3.8)

$$W = 12,87 \text{ kg} * (9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$W = 126,126 \text{ N}$$

Peso de la bomba en newton:

$$W = m * g$$

$$W = 14 \text{ kg} * (9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$W = 137,2 \text{ N}$$

Estas son las fuerzas necesarias para poder realizar los siguientes cálculos, dichos cálculos los realizamos con la ayuda del programa MDSolids como indica la figura 3.7, el programa calcula los momentos que

provocan las fuerzas que actúan sobre la plancha, además nos otorga un diagrama donde se muestra los momentos de flexión aplicados a la sección.

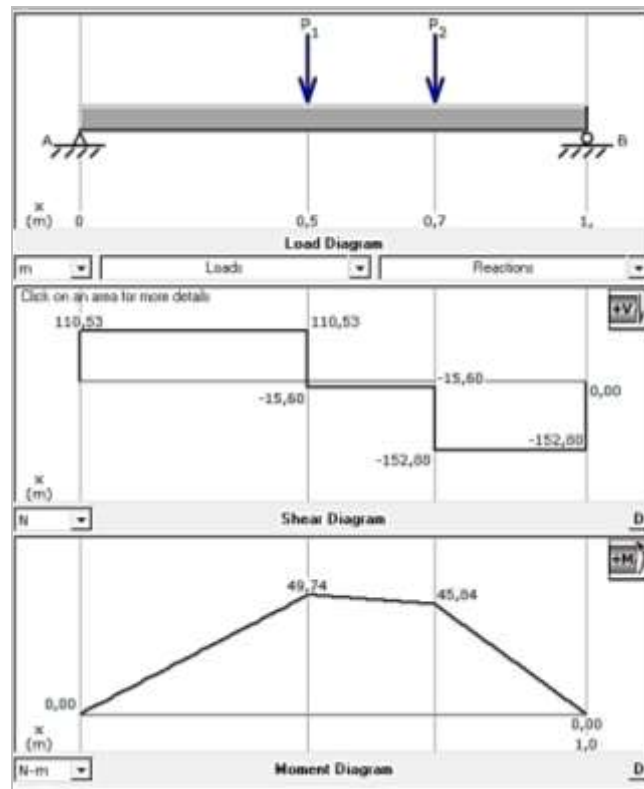


Figura 3. 7. Diagrama de fuerzas momento en la estructura de madera

Para los cálculos realizados anteriormente se verifica las propiedades de la plancha de madera en el ANEXO B, donde se encuentra el momento flexionante mínimo que tolera, con lo cual se demuestra que la estructura no sufre deformación extrema por pesos ya que el análisis proporcionó un esfuerzo tensionante que se encuentra dentro de los rangos sugeridos por el fabricante.

Se utilizó Madera MDP por ser un material muy liviano, resistente a deformaciones ocasionadas por el peso, también da un excelente acabado en el módulo, resistente a las vibraciones y es económico.

3.2.3. Cuba de recepción

El sistema de tanques está compuesto por un tanque principal (Tanque 1) y un (Tanque 2) que se encarga de alimentar de agua al (Tanque1).

Con estas características se fabrica dos tanques para el depósito del fluido que son hechos de acrílico ANEXO C, el tanque principal (Tanque 1) es de 0.15 metros de diámetro y una altura de 0.70 metros, el volumen estimado a ocupar en este tanque es de 12,37 litros, mientras que el segundo tanque de reserva (Tanque2) es una cuba de 0,5 metros de ancho, 0,35 metros de profundidad y 0,40 metros de altura y el volumen estimado a ocupar en la cuba es de 70 litros de agua. Como se muestra en la figura 3.8

- **Tanque 1 (Cilindro):**

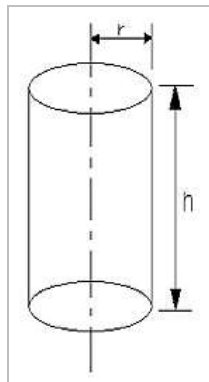


Figura 3. 8. Depósito de fluido

$$V = \pi * r^2 * h$$

(3.9)

Por lo tanto:

$$V = \pi * (0,075m)^2 * (0,7m)$$

$$V = 12,37 \text{ lt}$$

Procedimiento de Cálculo

Para la elaboración de la estructura se va a formar un cilindro que va a servir como depósito.-El prototipo utiliza un tanque de reserva (Tanque 2) para representar al embalse de agua. Una bomba se encarga de suministrar agua al tanque principal (Tanque 1). Para la fabricación del cilindro se selecciona el acrílico de 3mm de espesor debido a su excelente resistencia a la intemperie, además debido a esta característica el material no demuestra cambios significativos en sus propiedades físicas aun estando expuesto a largos periodos de tiempo, la transmisión de visibilidad es del 92% en cuanto a la estética y su apreciación es excelente, gran resistencia a fuerzas internas de presión (10atm), se puede utilizar con químicos como (agua, álcalis, ácidos diluidos, hidrocarburos), alto aislamiento eléctrico mejor que el vidrio, soporta temperaturas de deflexión (límite de temperatura en el cual el material empieza a perder la rigidez) de 72° a 100°C, ligereza peso específico de 1,19gr/cm³, es 50% más ligero que el vidrio, 43% más ligero que el aluminio, dureza similar a la de los metales no ferrosos como el cobre y el latón, retarda la flama en caso de incendio.(figura 3.9)



Figura 3. 9. (Tanque 1) principal

Cálculos para la selección del acrílico

Para poder saber si el material deseado será lo suficientemente capaz de resistir la presión ejercida por cantidad de volumen de agua que contendrá es necesario calcular el esfuerzo longitudinal en un cilindro de pared delgada.

$$\sigma = \frac{P * D_m}{4 * t}$$

(3.10)

Dónde:

σ = Esfuerzo Longitudinal en un cilindro

P = Presión en la pared

Dm = Diámetro Medio

t = Espesor de la pared

El peso específico del agua a 15°C que usamos está en la figura 3.10:

$$P = \gamma * h$$

(3.11)

Dónde:

γ = Peso específico del agua

$$P = (9,81 \frac{KN}{m^3}) * (0,7m)$$

$$P = 6,86 \frac{KN}{m^2}$$

$$P = 6,86 KPa$$

$$Dm = \frac{D_e - D_i}{2}$$

$$Dm = \frac{(0,15 - 0,147)m}{2}$$

$$Dm = 0,0015m$$

$$\sigma = \frac{(6,86KPa) * (0,0015m)}{4 * (0,003m)}$$

$$\sigma = 0,858KPa$$

$$\sigma = 8,58 \times 10^{-4} MPa$$

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica μ (Pa · s) o (N · s/m ²)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Figura 3. 10. Propiedades del agua

Fuente: [13]

En la tabla de especificaciones técnicas que se muestra en la figura 3.11, el esfuerzo es de 3103 MPa mientras que para el acrílico usado para los cilindro el esfuerzo es de 0,858 KPa es menor del que se describe en la tabla por lo tanto se concluye que el cilindro está bien diseñado y soportara la presión ejercida por el agua que contendrá.

Índice de refracción	1.49 mínimo
Nd. 296 K (23 C) (Material no Pigmentado)	1.50 máximo
Gravedad Especifica (Material no Pigmentado)	1.18 - 1.19
% Nebulosidad (Material Incoloro)	2.0 máxima
% Transmisión de Luz para espesores de : 1.5 mm a 5.00 mm 5.6 mm a 25.4 mm	92 mínimo 90 mínimo
% Transmitancia espectral a cualquier longitud de onda en la región 290 - 330 nm - con 6.3 mm de espesor de lamina (Material Incoloro)	5 máxima
Factor de desplazamiento para espesores de : 1.5 mm - 5.0 mm 5.6 mm - 25.4 mm (Colores Transparentes)	50 máximo 80 máximo
Dureza Barcol	50 ± 2
% Encogimiento	2.8 máxima
Esfuerzo a la tensión MPa (Kgf/cm)	3103 mínimo (31651)
% Elongación a la ruptura	2 - 5
Modulo de Elasticidad MPa (Kgf/cm)	3108 (31,700)
Resistencia al Impacto Ranurado (J/m)	17.81
Dimensiones	0.30 X 1.22 (3 mm de espesor)
Dimensiones	0.60 X 1.22 (6 mm de espesor)

Figura 3. 11. Especificaciones técnicas del acrílico de 3mm

Fuente: [15]

- Tank2 (Tanque de Reserva):

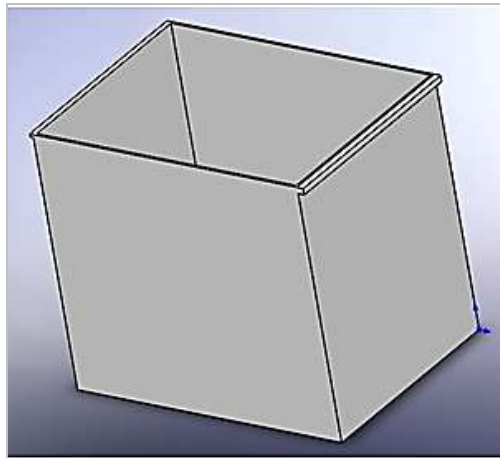


Figura 3. 12. Tanque de Reserva (Tanque2)

$$V = l * a * h$$

(3.12)

Para la fabricación del tanque de reserva figura 3.12 se selecciona el acrílico de 4mm de espesor, se debe a que su volúmen debe ser mayor o igual a la suma del volúmen del tanque principal (Tanque 1) acoplado en la parte superior.

$$V = (0,50m) * (0,35m) * (0,40m)$$

$$V = 0,07m^3$$

$$V = 70 l$$

Procedimiento de Cálculo

Dónde:

V= Volúmen del líquido

σ = Esfuerzo Longitudinal del recipiente

m = masa del recipiente

ρ = Densidad del líquido

P = Fuerza

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$m = V * \rho$$

$$m = (70l) * 1 \frac{kg}{l}$$

$$m = 70 kg + m_{acrílico}$$

$$m = 70 kg + 0,5 kg$$

$$m = 70,5 kg$$

$$W = m * g$$

$$W = 70,5kg * (9,8 \frac{m}{s^2})$$

$$W = 690 N$$

3.3. Selección de elementos constitutivos

3.3.1. Selección de la bomba

Dentro de las soluciones disponibles para el llenado del tanque se optó por escoger la combinación de una bomba centrífuga con un variador de velocidad, para que de este modo se pueda lograr la variación del caudal de entrada al tanque y por ende la variación del nivel de los mismos.

El costo de este sistema es relativamente alto, ya que al tratar de conseguir una bomba centrífuga adecuada, surgieron algunos inconvenientes, primero se consideró la potencia de la bomba, ya que no se

podía considerar bombas que manejaran un caudal muy grande, ya que el objetivo era alimentar a un tanque de una capacidad limitada, un tanque para demostraciones y pruebas. De este modo se decidió buscar alternativas con bombas monofásicas, las cuales tienen un precio reducido y menor potencia, pero el control de la velocidad de estas bombas no se lo puede realizar con drive de frecuencia ajustable ya que no existe para motores monofásicos, lo que implicaría para el control de estos motores la implementación de un controlador de voltaje AC/AC.

Finalmente, se optó por una bomba trifásica de poca capacidad, que se ajuste a las necesidades, por tal motivo se compró una bomba centrífuga trifásica de 0.5HP marca Thebe, como se muestra en la figura 3.13 cuya capacidad es de 9.6 [m³/h] a una altura máxima de 16.7 [m], una de las menores potencias a nivel comercial. En el ANEXO D se observa las características técnicas de la bomba.



Figura 3. 13. Bomba Centrífuga

Fuente: [14]

Tabla 3. 2**Datos de placa de la bomba**

Marca	Thebe
Potencia	½ Hp
Frecuencia	60Hz
RPM	3480
Corriente	1.80 Amp
Voltaje	220 V

Se utilizará una hoja de cálculo de Excel, la cual facilitará la selección de la bomba. Esta hoja (ver Anexo D-1) es tomada del libro de mecánica de fluidos de Mott. Considerando las pérdidas por los accesorios y la tubería se optará por una de 0.5 HP con las características mostradas en la tabla 3.2

3.3.2. Tuberías y Accesorios

A medida el agua fluye por tuberías, codos, válvulas y otros dispositivos, figura 3.14 ocurren pérdidas de energía debido a la fricción interna del material con el fluido, estas pérdidas de energía traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema. En base al análisis anterior y a la distribución del sistema hidráulico a diseñarse y posteriormente a construirse se escogió la tubería y accesorios de PVC (cloruro de polivinil).

**Figura 3. 14. Tuberías y accesorios de PVC**

Fuente: [15]

Para la elaboración del sistema de recorrido del agua se tomó en cuenta que se posee una considerable cantidad de agua, ya que se tiene un tanque de 12 litros aproximadamente, por lo tanto, el calibre de la tubería y sus accesorios será de 1 pulgada en la succión y de $\frac{3}{4}$ en la descarga. Como el sistema es automático la apertura o cierre al paso del fluido (agua) se lo realiza mediante una válvula de bola, la cual va estar controlada por un variador de frecuencia.

Válvulas de Bola

Para este sistema se utilizará una válvula tipo bola para tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada porque se abren mediante el giro del eje unido a la esfera perforada, de tal forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. La posición de la maneta de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada).

La figura 3.15 muestra el tipo de válvula utilizado en al sistema de entrenamiento.



Figura 3. 15. Válvula de Bola

Fuente: [15]

Válvula Check

La válvula check de $\frac{3}{4}$ de pulgada, estará conectada en la salida de la bomba de realimentación y tiene la función de impedir que la columna de agua que se encuentra en la tubería que suministra el líquido al tanque acoplado se regrese y dañe a la bomba o altere el tiempo del lazo de control. La figura 3.16 muestra la válvula check instalada en el sistema de entrenamiento.



Figura 3. 16. Válvula Check

Fuente: [15]

Antes de empezar con los cálculos debemos plantearnos con claridad cuáles son las características del sistema.

El sistema consta de un tanque de reserva (Tank2), la bomba se encargara de succionar el agua de dicho tanque y transportarla por la tubería al tanque principal (Tank1). Se utilizará tubería PVC tanto para la línea de succión como para la descarga.

Ahora en la línea de succión tenemos los siguientes datos:

- Longitud de la línea 0.18 m
- Un acople de tanque de 1"

- Una unión universal 1”.

Ahora como tenemos una línea de descarga a continuación se describe los elementos que intervienen:

- Longitud de la línea 1.65 m.
- Una reducción de 1” a ¾”.
- Una válvula Check de ¾”.
- Dos codos estándar de 90° de ¾”.

Y finalmente en la línea de retorno del (Tank1) al (Tank2) tenemos los siguientes datos:

- Longitud de la línea 0.98 m
- Dos acoples de tanque de ¾”.
- Tres codos estándar de 90° de ¾”.
- Una válvula tipo bola de ¾”.

A continuación se procede a realizar los cálculos:

1. Procedimiento de Calculo Ahora calcularemos el factor de fricción (F_T) para tubería de succión de 1”, para ello antes se calcula el número de Reynolds y la rugosidad relativa:

$$Rugosidad\ Relativa = \frac{D_i}{E}$$

(3.13)

Dónde:

D_i = Diámetro Interno de la tubería de PVC

E = Rugosidad del material Ver tabla de la figura 3.17

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo extruido; cobre, latón y acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil, recubierto	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil, no recubierto	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien fabricado	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Figura 3. 17. Rugosidad del plástico.

Fuente: [13]

$$D_i = D_e - 2 * t$$

(3.14)

Dónde:

D_i = Diámetro Interno de la tubería de PVC

D_e = Diámetro Externo de la tubería de PVC

t = Espesor de la tubería de PVC

$$D_i = (1,90\text{cm}) - 2 * (0,29\text{cm})$$

$$D_i = 0,0132\text{m}$$

$$\frac{D_i}{E} = \frac{0,0132\text{m}}{3 \times 10^{-7}\text{m}} = 44000$$

$$N_R = \frac{V * D_i * \rho}{\mu}$$

(3.15)

Dónde:

N_R = Número de Reynolds

V = Velocidad del fluido en m/s

D_i = Diámetro Interno de la tubería de PVC

ρ = Densidad del agua a 15 °C. Ver tabla de la figura 3.10

μ = Viscosidad dinámica del agua a 15°C. Ver tabla de la figura 3.10

$$N_R = \frac{0.723(m/s) \times 0.0132(m) \times 1000(Kg/m^3)}{1.15 \times 10^{-3}(N \cdot s/m^2)}$$

$$N_R = 77900$$

$N_R = 7.79 \times 10^4 > 4000$ Es flujo Turbulento

$$f_t = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 * \left(\frac{D_i}{\epsilon} \right)} \right) + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right]^2}$$

$$f_t = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 * (44000)} \right) + \frac{5,74}{8298,7^{0,9}} \right]^2}$$

$$f_T = 0,026$$

$f_T = 0,0268$ Es el factor de fricción para Tubería PVC

Ahora realizaremos los cálculos de pérdidas en la línea de succión:

a) Pérdida en la entrada

$$h_1 = K * \frac{V^2}{2 * g}$$

Para conducto de proyección hacia adentro:

K = 1 Ver figura 3.18

$$h_1 = 1 * \frac{(1,17 m/s)^2}{2 * (9,8 m/s^2)}$$

$$h_1 = 0,069 \text{ m}$$

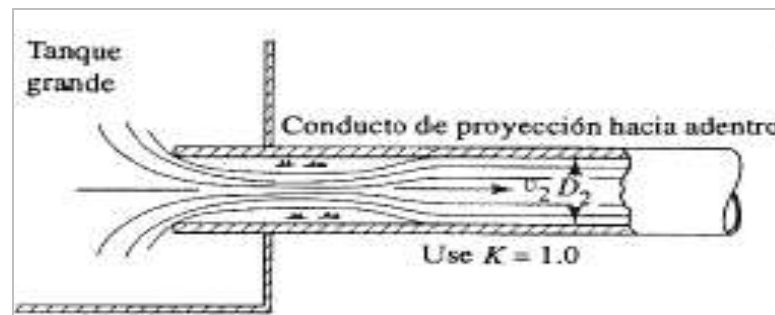


Figura 3. 18. Coeficiente de fricción para la entrada de proyección hacia adentro

Fuente: [13]

a) Pérdida por fricción en la línea de succión:

$$h_2 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_2 = \left(0,026 * \frac{0,30\text{m}}{0,019\text{m}} \right) * \frac{(1,17 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_2 = 0,035 \text{ m}$$

b) Pérdida en 2 codos PVC de 90° de 3/4":

$$h_3 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_3 = (0,026 * 30) * \frac{(2,91 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_3 = (0,804) \times (2 \text{ codos})$$

$$h_3 = 0,69 \text{ m}$$

c) Pérdida en la válvula Check de 3/4":

$$h_4 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_4 = (0,0268 * 135) * \frac{(2,91 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_4 = 1,56 \text{ m}$$

d) Pérdida por fricción en la línea de descarga:

$$h_5 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_5 = \left(0,0268 * \frac{0,80\text{m}}{0,019\text{m}} \right) * \frac{(2,91 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_5 = 0,48\text{m}$$

e) Pérdida en los 3 codos PVC de 90° de ¾":

$$h_6 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_6 = (0,0268 * 30) * \frac{(2,91 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_6 = (0,69) \times (3 \text{ codos})$$

$$h_6 = 1,02 \text{ m}$$

f) Pérdida en la válvula de bola de ¾":

$$h_7 = \left(f_T * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_7 = (0,0268 * 150) * \frac{(2,91 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_7 = 1,73 \text{ m}$$

El paso siguiente es calcular la pérdida total, realizando una sumatoria de todas las pérdidas calculadas anteriormente:

$$h_L = \sum_{i=1}^7 h_i$$
$$h_L = 6,51 \text{ m}$$

3.3.3. Ruedas Móviles con Seguro

Cuando se escoja el tipo de rueda que se va usar en una estructura, hay que fijarse en el peso de éste y la frecuencia con la que va a ser desplazado en el ANEXO E se detallan las características técnicas, ya que en ellas influye la calidad y tipo de fijación. La rueda que se usa en este proyecto es de material Nylon con seguro, la misma que se fija a la estructura con una placa metálica como se muestra en la figura 3.19, que es muy resistente al peso que va a soportar. Y también hay otras con un canal donde se afirma la madera, pero es para estructuras muy livianas.



Figura 3. 19. Rugosidad del plástico.

Fuente: [14]

Especificaciones de la rueda

- a.** Material de la rueda: negro pu neumático + gris pp núcleo.
- b.** Diámetro de la rueda: 80mm.

- c. Ancho de la banda de rodadura: 32mm.
- d. Altura de montaje: 106mm.
- e. Teniendo: de un solo rodamiento de bolas.
- f. Capacidad de carga: 100kgs (dinámica).
- g. Tamaño de tornillo: m12x30.
- h. Palanca de freno: de nylon.
- i. Tipo de freno: freno total.
- j. Cabeza giratoria: doble bola de caminos de rodadura.
- k. Acabado: Tratamiento de electroforesis, Zinc- plateado

3.4. Selección de equipos de control

3.4.1. Selección de la Tarjeta NI MyDAQ

La tarjeta NI MyDAQ pertenece a las opciones de herramientas académicas que ofrece LabVIEW, está diseñada para aplicaciones de laboratorio y pruebas, sin embargo proporciona gran confiabilidad al alcanzar grandes tasas de velocidad de adquisición de datos. Estas tarjetas son de fácil instalación, requieren de poco mantenimiento y es necesario de un puerto USB para conectarse al computador.

Las tarjetas de adquisición de datos dentro de la planta de control de nivel, se encargan de adquirir las señales que representa el valor de nivel del líquido en el tanque y que es proporcionada por el sensor ultrasónico. Del mismo modo las tarjetas de adquisición de datos se encargan de generar la señal de salida del controlador ejecutado con el programa de LabVIEW. Las conexiones desde y hacia los distintos dispositivos se realizan en el bloque conector y las señales son enviadas hasta la tarjeta por medio del cable USB figura 3.20

La tarjeta NI MyDAQ es una tarjeta de adquisición de datos portátil (DAQ). Este dispositivo utiliza la plataforma NI LabVIEW. NI MyDAQ y

proporciona dos entradas analógicas, dos salidas analógicas, ocho entradas y ocho salidas digitales, entrada y salida de audio, tres fuentes de alimentación, y un multímetro digital en un compacto dispositivo USB. En este proyecto se va utilizar una tarjeta MyDAQ, de la cual se emplean dos entradas análogas provenientes del sensor ultrasónico, dos salidas analógicas que es enviada a la entrada analógica del variador de voltaje. Para más detalles de la Tarjeta de Adquisición MyDAQ refiérase al Anexo F.



Figura 3. 20. NI MyDAQ y su conexión al PC.

Fuente: [10]

3.4.2. Selección del Sensor Ultrasónico

El sensor utilizado es el HRXL- MAXSONAR-WRM (MB7369). Su principio de funcionamiento es la emisión y recepción de señales ultrasónicas figura 3.21

En el Anexo G se adjunta la hoja técnica de dicho sensor, sin embargo a continuación se detallan las características más importantes que ayudarán tanto en el diseño electrónico como mecánico del sistema de entrenamiento.

- Voltaje de alimentación: 2.7V - 5.5V DC.
- Rango de operación: desde los 30 cm, ajustables el límite superior.

- Salida Análoga: La tensión analógica de salida es normalmente de ± 5 mm de la salida serial.
- Consumo de corriente: 3.1 mA
- Factor de escala: $(V_{cc} / 5120)$ por 1 mm.



Figura 3. 21. Sensor HRXL- MAXSONAR-WRM (MB7369)

Fuente: [16]

3.5. Selección de aparatos de maniobra

3.5.1. Elementos de Maniobra

a) Variador de Velocidad

Dentro de las soluciones disponibles para el llenado del tanque se optó por escoger la combinación de una bomba centrífuga con un variador de velocidad modelo DELTA de la Serie VFD007E23A, como se muestra en la figura 3.22, para que de este modo se pueda lograr la variación del caudal de entrada al tanque y por ende la variación del nivel del mismo.

El variador de velocidad marca DELTA de la Serie VFD007E23A, trabaja con el rango de voltaje de frecuencia de motor de CA es $\leq 240V$ ($\leq 480V$ para los modelos 460V) y la capacidad de la corriente principal de suministro debe ser de $\leq 5000A$ RMS ($\leq 10000A$ RMS para los modelos $\geq 40hp$ (30kW)).

En el Anexo H se adjunta la hoja técnica del variador de velocidad marca DELTA de la Serie VFD007E23A.

La etapa de control de este variador se compone de un accesorio denominado panel de operación y de un bloque de terminales de control, para distintos propósitos. Para iniciar el trabajo con el variador de velocidad, por medio del panel operador, se debe configurar los datos de placa del motor, del cual se va a conectar el variador de velocidad.

Además se deben configurar el comando denominado fuente de comandos, que especifica desde donde el variador de velocidad va a recibir las instrucciones para su operación. Dentro de las opciones de fuentes de comandos están: enviar comandos desde el panel operador, enviar comandos desde el bloque de terminales de control, y finalmente enviar los comandos desde una interface. Para el desarrollo de esta aplicación tomamos la opción de enviar los comandos desde el bloque de terminales de control.



Figura 3. 22. Variador de Frecuencia DELTA de la Serie VFD007E23A

Fuente: [16]

3.6. Diseño eléctrico

3.6.1. Diagrama de control

El diagrama de control está desarrollado entre dos líneas horizontal que representa la alimentación, los símbolos y elementos de operación como contactores, relés y más aparatos accionados eléctricamente están uno seguido de otros.

3.6.2. Diagrama de fuerza.

Está representado en un ajuste multipolar, las líneas horizontales que factualmente van en la parte superior de los circuitos de potencia representa la red, con la finalidad de permitir al usuario determinar las características eléctricas de cada receptor.

Al cumplir estos requerimientos, el diagrama de fuerza como el de control se observa en el ANEXO I de los planos eléctricos.

3.6.3. Protecciones eléctricas

De acuerdo con lo que establece el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión (REBT), en la instrucción IMIE BT 020, todo circuito debe estar protegido contra los efectos de las sobre intensidades que se pueden presentar en el sistema de circuitos.

Además de las protecciones contra sobre intensidades, el REBT en la instrucción IMIE BT 021 se refiere a las protecciones contra contactos directos e indirectos, que se pueden producir en una instalación eléctrica.

Según el REBT la protección contra corto circuito se puede efectuar con una de estas dos opciones:

1. Fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas.
2. Interruptores automáticos con sistema de corte (disparo) electromagnético, disparadores tipo N.
3. La protección contra sobrecarga se puede efectuar con alguna de estas dos opciones:
 - a) Fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas.
 - b) Interruptores automáticos con curva térmica de corte (disparo), disparadores tipo O.
4. El REBT prescribe para la protección contra los contactos directos.
5. El alojamiento de las partes activas de la instalación eléctrica a una distancia tal que no pueda haber un contacto accidental.
6. La interposición de obstáculos que impidan todo contacto eventual con las partes activas de la instalación.
7. Recubrir las partes activas de la instalación con aislamiento apropiado.

3.6.4. Coordinación de protecciones [18]

Es la implementación de un dispositivo de protección contra cortocircuitos con un dispositivo de protección contra sobrecargas. La coordinación de protecciones tiene por objetivo interrumpir a tiempo una corriente de sobrecarga o una corriente de cortocircuito para que estas no causen daño a personas ni instalaciones eléctricas. La norma IEC 60947 define tres tipos de coordinación dependiendo del grado de deterioro de los equipos después de que ocurra el cortocircuito.

Coordinación tipo 1: En un cortocircuito, no debe causar daño a personas e instalaciones, no debe existir proyección de materiales encendidos, son aceptables daños en el contactor y relé de sobrecarga, en caso de protección con fusibles, éstos deberán ser reemplazados.

Coordinación tipo 2: En un cortocircuito, no debe causar daño a personas e instalaciones, no debe existir proyección de materiales encendidos, el relé de sobrecarga no deberá sufrir ningún daño, los contactos del contactor podrán sufrir alguna pequeña soldadura fácilmente separable, en cuyo caso no se reemplazarán componentes salvo fusibles.

Coordinación total: En un el cortocircuito, no debe causar daño a personas e instalaciones, no debe existir proyección de materiales encendidos, Según la norma IEC 60947-6-2, en caso de cortocircuito ningún daño ni soldadura de contactos es aceptable en ninguno de los aparatos que componen la salida motor, permitiendo continuidad de servicio y reduciendo tiempos de mantenimiento.

3.6.5. Selección de elementos de protección

Para seleccionar los elementos de protección, se presenta dos alternativas de asociación de los equipos de protección mostradas en la figura 3.23

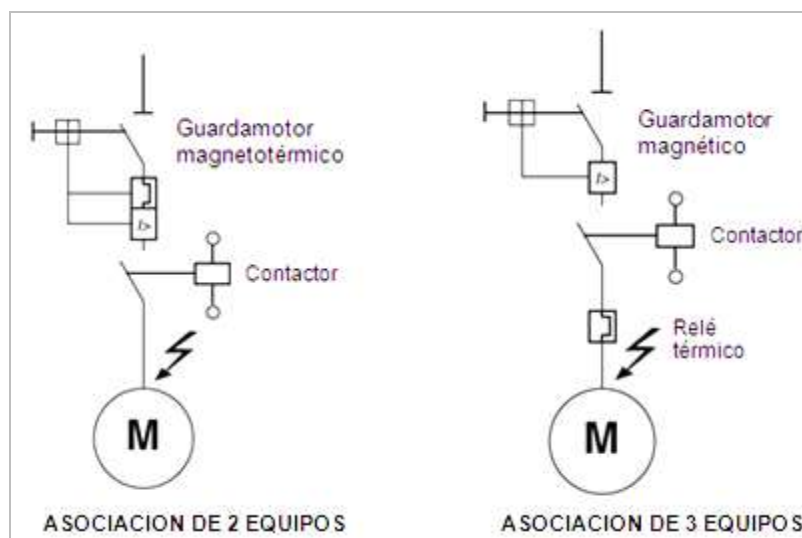


Figura 3. 23. Alternativas de asociación de equipos de protección.

Fuente: [18]

3.6.6. Selección de los fusibles

Fusible para protección del circuito de potencia

Se puede seleccionar el fusible del circuito de potencia considerando la corriente nominal de la de bomba 1,80 Amp y del variador 5,1Amp. Con la ecuación 2.65 se determina la corriente de selección.

$$I_a = 1,8 \times (I_B + I_V)$$

(3.16)

$$I_a = 1,8 \times (1,80 + 5,1)$$

$$I_a = 12,42 \text{ Amp.}$$

Con el valor antes obtenido, en la tabla 3.3 se muestra las características de los fusibles de protección requeridos por fase ANEXO J. La figura 3.24 muestra el fusible y la porta fusible seleccionado.

Tabla 3. 3

Fusibles para el circuito de potencia

Marca	CAMSCO
Clase	gG
Punto de Fusión	20 Amp



Figura 3. 24. Fusible y porta fusible marca CAMSCO

Fuente: [18]

En la figura 3.25 se puede determinar la corriente para el interruptor magneto-térmico, utilizando la ecuación 3.17. Se selecciona un interruptor magneto-térmico con las características mostradas en la tabla 3.4, para mayor información ver su hoja técnica ANEXO K.

$$I_p = 1,5 \times I_n$$

(3.17)

$$I_p = 1,5 \times (1,80 + 5,1)$$

$$I_p = 10,35 \text{ Amp.}$$

**Tabla 3. 4
Características del interruptor magneto-térmico**

Marca	CHINT
Datos Eléctricos	6 Amp
# de polos	3P
Capacidad de ruptura	3KA



Figura 3. 25. Interruptor Magneto-térmico CHINT

Fuente: [18]

3.6.8. Selección del guardamotor

El guardamotor como muestra la figura 3.26, se dimensionan para 1.5 veces la corriente nominal, en este caso seleccionamos de la marca EATON con las características mostradas en la tabla 3.5, sus características técnicas se encuentran en el ANEXO L.

Tabla 3. 5

Características del guardamotor

Marca	EATON
Datos Eléctricos	1,0 a 1,6 Amp
# Polos	3P



Figura 3. 26. Guardamotor EATON

Fuente: [18]

3.6.9. Selección del contactor

La elección de los contactores se la hará en función de:

- Clase de corriente (alterna o continúa).
- Voltaje de la red (V).
- Potencia del receptor (KW).
- Intensidad nominal (A)
- Voltaje de empleo para el circuito de control (V).
- Forma en que se hace el arranque.

El motor de la bomba arrancará en forma directa, por ello se estima que la intensidad de arranque para este tipo de motores viene a ser de 6 veces la I_n . Para un arranque directo los contactores recomendados son de categoría AC 3 como muestra la figura 3.27

Tabla 3. 6

Datos de placa del motor de la bomba

Marca	THEBE
Potencia	$\frac{1}{2}$ Hp

Frecuencia	60 HZ
Fp	0.75
Voltaje	220V
Corriente	1.80 Amp
RPM	3480

La tabla 3.6 hace referencia a los datos de placa del motor de la bomba, con esta información se seleccionaran los contactores ANEXO M.



Figura 3. 27. Contactor CHINT

Fuente: [18]

La tabla 3.7 hace referencia a las características del contactor CHINT seleccionado.

Tabla 3. 7

Características del contactor

Marca	CHINT
Modelo	NCI-1810
# de polos	3
Tipo de montaje	Sobre Riel DIN
Contactos auxiliares	1NO-NC
Voltaje de bobina	220 VAC
Voltaje de operación	220 VAC

3.7 Selección de la fuente de alimentación

La selección de la fuente de alimentación es un aspecto muy importante dentro de los elementos constitutivos de la planta, puesto que será ésta la que provea de energía al sensor. Es así que para el sensor ultrasónico se necesita un voltaje comprendido entre 2.7 a 5.5 Vdc.

Para este se utilizará una fuente de computadora el cuál se encarga básicamente de transformar la corriente alterna de la línea eléctrica comercial en corriente directa, la misma que alimentará al sensor ultrasónico HRLX-Max Sonar. La fuente escogida es una fuente marca QUASAD, con salida de voltaje de 12V; -12V; 5V; -5V; +3.3V. La figura 3.28 muestra la fuente seleccionada.



Figura 3. 28. Fuente de alimentación QUASAD

3.7.1. Selección de conductores

Los conductores eléctricos deben ser seleccionados o calculados, al igual que el resto de los elementos que conforman el diseño eléctrico. Una deficiente elección de los conductores puede dar lugar a:

- Elevadas caídas de voltaje a nivel de los receptores.
- Calentamiento excesivo de los conductores.
- Coste elevado de la instalación por sobredimensionar las secciones de los conductores.

- Poner conductores de sección correcta pero con aislamientos innecesarios que encarecen el producto.

a) Conductor eléctrico del circuito de control

Según las especificaciones del ANEXO N para el circuito de control, se recomienda utilizar cables con una sección adecuada para la intensidad, con sección de 1,31m², con dicha información se seleccionará un conductor # 16 (flexible).

b) Selección del conductor para el circuito de potencia.

Cable de alimentación principal

Es la suma de las corrientes NOMINALES de todos los elementos que se encuentran conectados a la fuente de alimentación. Entonces se selecciona una sección de 5,261 mm² que equivale a un conductor #10 AWG (flexible) para cada fase, seleccionado del catálogo de ELECTROCABLES ANEXO O.

$$I_{NT} = 45,6 \text{ Amp}$$

c) Conductor eléctrico para la bomba.

Para la selección del conductor adecuado para la bomba se toma en cuenta la corriente nominal, con la ecuación 3.18, se calcula.

$$I_n = \frac{P}{fp * \sqrt{3} * V * \eta}$$

(3.18)

$$I_n = \frac{\frac{1}{2} * 746}{0.75 * \sqrt{3} * 220 * 0.72}$$

$$I_n = 1.81 \text{ Amp} \cong 2 \text{ Amp}$$

El valor de la corriente nominal es de 2 (A). Con el cálculo determinado para la bomba es el # 18 AWG, pero por seguridad se selecciona un conductor adecuado es el cable sucre 3x12 AWG THHN, según la tabla de intensidad de corriente admisible para conductores de cobre secciones AWG. Este cable también nos sirve para el variador de frecuencia, ya que están unidos por el mismo cable conductor y esta es controlada por el mismo. En el ANEXO P, se puede observar las características de los conductores seleccionados.

3.7.2. Selección de canaletas

Las canaletas son estructuras que permiten resguardar los cables eléctricos de factores externos que puedan dañar, tales como humedad, polvo, temperatura. Para la selección se sumó la sección de todos los cables que se quieren instalar dejando un 20% de espacio libre.

Con lo expuesto anteriormente se seleccionaron canaletas lisas color blanco con cinta adhesiva marca DEXON de 20 x 12 mm como se muestra en la figura 3.29, estas canaletas vienen provistas de una película de silicona para retención de cables, lo que facilita el proceso de instalación.



Figura 3. 29. Canaletas lisas DEXON

Fuente: [15]

Las dimensiones de las canaletas seleccionadas se detallan en la figura 3.30.

ALTURA (mm)	DIMENSIONES A x B (mm)	REFERENCIA
7	13x7	3CA _{MF} ^{BL} 13x7 (CA)
10	10x10	3CA _{MF} ^{BL} 10x10 (CA)
12	20 x 12	3CA _{MF} ^{BL} 20x12 (CA)
	32 x 12	3CA _{MF} ^{BL} 32x12 (CA)
	32 x 12 cd	3CA _{MF} ^{BL} 32x12CD (/CA)
13	60 x 13	3CAGP60x13 (CA)
16	60 x 16 cd	3CABL60x16CD (/CA)
20	20 x 20	3CA _{MF} ^{BL} 20x20 (CA)
	75 x 20 cd	3CA _{MF} ^{BL} 75x20CD (/CA)
25	25 x 25	3CA _{MF} ^{BL} 25x25 (CA)
	40 x 25	3CA _{MF} ^{BL} 25x25 (CA)
	40 x 25 cd	3CA _{MF} ^{BL} 40x25CD (/CA)
40	40 x 40	3CA _{MF} ^{BL} 40x40 (CA)
	60 x 40	3CA _{MF} ^{BL} 60x40
	60 x 40 cd	3CA _{MF} ^{BL} 60x40CD
45	100 x 45	3CA _{MF} ^{BL} 100x45

CA Canaleta con Adhesivo CD Canaleta con División

La capacidad de las canaletas puede variar, dependiendo del método de cableado y también de la forma de los cables.

Figura 3. 30. Dimensiones canaletas lisas

Fuente: [18]

3.7.3 Selección de canaletas ranuradas y rieles.

Para seleccionar estos elementos se tomó en cuenta principalmente un precio conveniente ya que estos permanecerán estáticos sin desgastarse por lo que invertir mucho dinero en estos elementos será un desperdicio, la marca que me brinda un precio accesible y de buena calidad es la marca DEXON.

Se seleccionaron canaletas plásticas ranuradas color gris marca DEXON de 40 x 60 mm y 25 x 40 mm como se muestra en la figura 3.31, para que los cables se puedan colocar y retirar con facilidad.

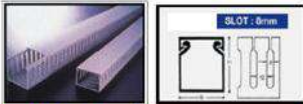


Figura 3. 31. Canaleta ranurada gris DEXON

Fuente: [15]

Las dimensiones de las canaletas seleccionadas se detallan en la figura 3.32

CANALETAS PLASTICAS RANURADAS COLOR GRIS DEXON
LA DISTANCIA DE LAS RANURAS ES 8 mm



REFERENCIA	CARACTERISTICAS	MEDIDAS ANCHO(mm) X ALTO(mm) X LARGO(m)	SECCION (mm ²)	CARTON
AD-0.5L	CANALETA PLASTICA	15 mm x 25 mm x 2m	375 mm ²	230
AD-0L	CANALETA PLASTICA	25 mm x 25 mm x 2m	625 mm ²	120
AD-1.2L	CANALETA PLASTICA	33 mm x 33 mm x 2m	1089 mm ²	100
AD-1.5L	CANALETA PLASTICA	33 mm x 45 mm x 2m	1485 mm ²	76
AD-2L	CANALETA PLASTICA	45 mm x 45 mm x 2m	2025 mm ²	54
AD-2.2L	CANALETA PLASTICA	50 mm x 50 mm x 2m	2500 mm ²	46
AD-2.5L	CANALETA PLASTICA	65 mm x 45 mm x 2m	2925 mm ²	38
AD-3L	CANALETA PLASTICA	33 mm x 65 mm x 2m	2145 mm ²	54
AD-5.5L	CANALETA PLASTICA	60 mm x 60 mm x 2m	3600 mm ²	50
AD-6L	CANALETA PLASTICA	72 mm x 65 mm x 2m	4680 mm ²	40
AD-7L	CANALETA PLASTICA	70 mm x 100 mm x 2m	7000 mm ²	30
AD-8L	CANALETA PLASTICA	100 mm x 100 mm x 2m	10000 mm ²	18
VD-2	CANALETA PLASTICA	25 mm x 40 mm x 2m	1000 mm ²	100
VD-4	CANALETA PLASTICA	40 mm x 40 mm x 2m	1600 mm ²	64
VD-5	CANALETA PLASTICA	60 mm x 40 mm x 2m	2400 mm ²	42
VD-7	CANALETA PLASTICA	40 mm x 60 mm x 2m	2400 mm ²	48
VD-9	CANALETA PLASTICA	80 mm x 60 mm x 2m	4800 mm ²	38
VD-9.5	CANALETA PLASTICA	100 mm x 60 mm x 2m	6000 mm ²	30
VD-10	CANALETA PLASTICA	80 mm x 80 mm x 2m	6400 mm ²	30

Figura 3. 32. Características de las canaletas ranuradas DEXON


Fuente: [15]

Se eligieron rieles DIN metálicas simétricas de 35 mm como se aprecia en la figura 3.33, para el montaje del controlador con sus módulos de ampliación, contactor de fuerza, porta-fusibles, borneras y relés auxiliares.



Figura 3. 33. Riel DIN simétrica

Las dimensiones de las rieles seleccionadas se detallan en la figura 3.34.

RIEL DIN 

REFERENCIA	CARACTERÍSTICAS	MEDIDAS ANCHO X ALTO	LONGITUD	CARTON
RIEL-ALUM-35-1M	RIEL DE ALUMINIO	DIN-35 mm SIMETRICA	1 m	1
RIEL-ACER-35-1M	RIEL METALICA	DIN-35 mm SIMETRICA	1 m	50
RIEL-ACER-35-2M	RIEL METALICA	DIN-35 mm SIMETRICA	2 m	50

Figura 3. 34. Características de las rieles DIN simétricas

Fuente: [15]

3.7.4. Panel operador de mando

a) Selección de pulsadores.

Los pulsadores desempeñan un papel clave en la comunicación hombre-máquina. Existen varias marcas de pulsadores que realizan maniobras de activado y desactivado en un proceso de control, por lo que se utilizará la marca CAMSCO, como muestra en la figura 3.35 debido a que existe en stock en la bodega de la empresa y conforme a los lineamientos de la misma.



Figura 3. 35. Pulsadores CAMSCO, izquierda (marcha), derecha (paro)

Fuente: [18]

b) Parada de Emergencia

En casos de fallas y emergencia para la desconexión rápida, se selecciona un Interruptor pulsar-tirar marca CAMSCO, desconectando todo el circuito de mando y control, como muestra la figura 3.36



Figura 3. 36. Interruptor de emergencia tipo pulsar-girar para desenclavar

Fuente: [18]

c) Luces indicadoras

La luz verde mostrará que todo el sistema se encuentra energizado, y la roja que se activó un paro de emergencia o que el sistema está apagado (figura 3.37).



Figura 3. 37. Luces Indicadoras marca Camsco

Fuente: [18]

3.7.5 Montaje e instalación eléctrica del tablero de protección.

Como se hace mención el tablero de protección se encuentra ubicado detrás de la estructura metálica como se puede observar en la figura 3.38, cuyas dimensiones son:

- Altura = 60 cm
- Ancho = 40 cm
- Profundidad = 20 cm



Figura 3. 38. Tablero de Protección

Para implementar los elementos en el tablero, primero se realizó un diseño para la ubicación de los equipos y elementos de protección.

Antes de efectuar el montaje del tablero de potencia se efectuó el cableado y las conexiones de los elementos que intervienen en el sistema eléctrico, como se muestra en la figura 3.39. Se cablea los elementos de protección con cable #16 AWG los elementos de control, y con cable número

14 AWG los elementos de fuerza, cada cable tiene en sus extremos marquillas y terminales para asegurar un buen contacto. Todos los elementos se detallan en la tabla 3.6, para ello, se montaron en la placa interna del tablero donde se acoplan las canaletas ranuradas alrededor de la base del tablero, la sujeción ejecutada con tornillos de 4mm con su respectiva arandela, distribuyendo los espacios necesarios, seguidamente se ensambla la riel DIN, cuidando los sitios entre tornillos con la finalidad de proporcionar seguridad a la fijación, y la comodidad para el acoplamiento de los elementos que van sobre él, como porta-fusibles, interruptor Magneto-térmico, guarda-motor, contactor, variador de velocidad y fuente de alimentación variable.



Figura 3. 39. Conexión eléctrico del tablero de protección.

Tabla 3. 8

Elementos del tablero de protección

Cantidad	Descripción
3	Fusibles cilíndricos CAMSCO 10x38mm 20Amp
3	Porta fusibles 10x38mm 32 A CamSCO para riel DIN.
1	Interruptor Magneto-térmico CHINT 3P 6Amp 3KA
1	Guardamotor EATON 1.0-1.6 Amp
1	Contacto CHINT 3P 18Amp 220V-1NC
1	Contacto Auxiliar EATON frontal 1NO
1	Variador DELTA de la Serie VFD007E23A
1	Fuente Variable AC/DC 220V

15	Mtrs. Cable # 16 AWG (THHW - TFN) (blanco).
10	Mtrs. Cable Sucre 3x12 AWG THHN
10	Mtrs. Cable # 10 AWG (THHW) (Negro, Rojo y blanco).
1	Riel DIN de 35 mm x 1.00 m.
1	Toma corriente VETO 110AC
1	Funda de terminales aislados U # 16-14
2	Canaletas lisas DEXON 20x12mm
3	Canaleta plástica ranurada gris DEXON (25x40x2)mm
1	Mtrs. espiral de ½ pulgada
1	Libretines de marquillas DEXON (letras-números-signos)



Figura 3. 40. Elementos montados en el tablero de protección

Todo el cableado va según el tipo de conexión de cada equipo o accesorio de protección, algunas partes tienen cableado excesivo y se recomienda tener opciones de rutas por todas las canaletas plásticas, tomando en cuenta la parte de fuerza y la de protección, ya que puede haber ruido o interferencia al ser cruzadas diferentes señales con distintos corrientes y voltajes ver figura 3.40.

Finalmente se monta el tablero de control detrás de la estructura metálica con 4 pernos de 3/4 x 2 pulgadas, en la figura 3.41 se observa todo lo descrito.



Figura 3. 41. Tablero de control finalizado

3.8. Diseño de la interfaz gráfica con LabVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control, además nos da la capacidad de crear rápidamente una interfaz de usuario que nos permita interactuar con un sistema.

El diagrama de bloques que constituye el código fuente del VI, fue desarrollado utilizando diferentes tipos de funciones para la adquisición y control del flujo de datos.

3.8.1. Adquisición y comunicación

La adquisición de datos o señales, consiste en la toma de variables físicas del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador o dispositivo electrónico (sistema digital). Esto consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora.

Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecúa la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

Para el sistema de control implementado la variable física a ser censada es la distancia esto se logra con el sensor ultrasónico MAXSONAR-WRM (MB7369), el cual convierte la variable física en una señal eléctrica correspondiente medible, que en este caso es voltaje y su relación es de 0 a 5V, esto es digitalizado de tal manera que pueda ser procesado en la computadora, dicho proceso es llevado a cabo en la tarjeta de adquisición myDAQ que son la interfaz entre las señales eléctricas provenientes del sensor y la computadora, la comunicación se la realiza por el puerto USB (Universal Serial Bus), como se muestra la figura 3.42 el mismo que transmite y recibe la información necesaria para la correcta interacción de los diferentes dispositivos que constituyen el sistema de entrenamiento.



Figura 3. 42. Medio de conexión USB

Fuente: [10]

Las señales adquiridas que previamente fueron procesadas en la tarjeta myDAQ para lograr la comunicación son manipuladas en la PC de acuerdo a los requerimientos del sistema. Las señales de control digitales y analógicas producidas por la PC, se transmiten mediante cable blindado (VNTC

Instrumentación) 1PX18, como se muestra en la figura 3.43. Un cable apantallado es aquel que está protegido de las interferencias mediante una malla metálica. Tanto la transmisión como la recepción utilizan un par de conductores que si no están apantallados son muy sensibles a las interferencias en el ANEXO Q se detallan las características técnicas del cable blindado.



Figura 3. 43. Cable de Instrumentación

Fuente: [16]

Para la transmisión de las señales tanto de entrada y salida analógicas se utilizó un cable del tipo mencionado anteriormente, proveniente del sensor de nivel hacia la tarjeta MyDAQ y del variador hacia la misma.

3.8.2. Sistema de control de nivel

Para esto realizar este sistema necesitaremos una bomba, un variador de frecuencia, y una tarjeta MyDAQ.

Para comandar la velocidad se ha dispuesto de un variador de frecuencia DELTA de la Serie VFD007E23A, el mismo que recibirá una señal

de 0 a 10 Vdc provenientes de la MyDAQ, y este hará el control necesario para que la bomba funcione adecuadamente.

El variador de frecuencia es el centro de todo el control de velocidad y por lo tanto hay que prestarle la atención adecuada, ya que, se han añadido varias funcionalidades para mejorar el sistema y explotar al máximo sus capacidades.

Principio de Funcionamiento

La tarjeta de National Instruments NI MyDAQ proporcionará una salida analógica que varía desde 0vdc a 10vdc, la misma señal es la que se inyectará en el variador de frecuencia. Para esto hay que configurar la variante análoga de dicho variador (figura 3.44).

El punto más importante en el proceso y que puede derivar en un error en el proyecto es que hay que puentear las tierras.

Esto se debe a que son dos señales totalmente diferentes, por lo tanto, están referenciadas en diferente forma, lo que hace que al puentear las tierras o GND de los diferentes sistemas, estén todas referenciadas al mismo sitio y pueda haber una excelente compatibilidad en el desarrollo del proceso.

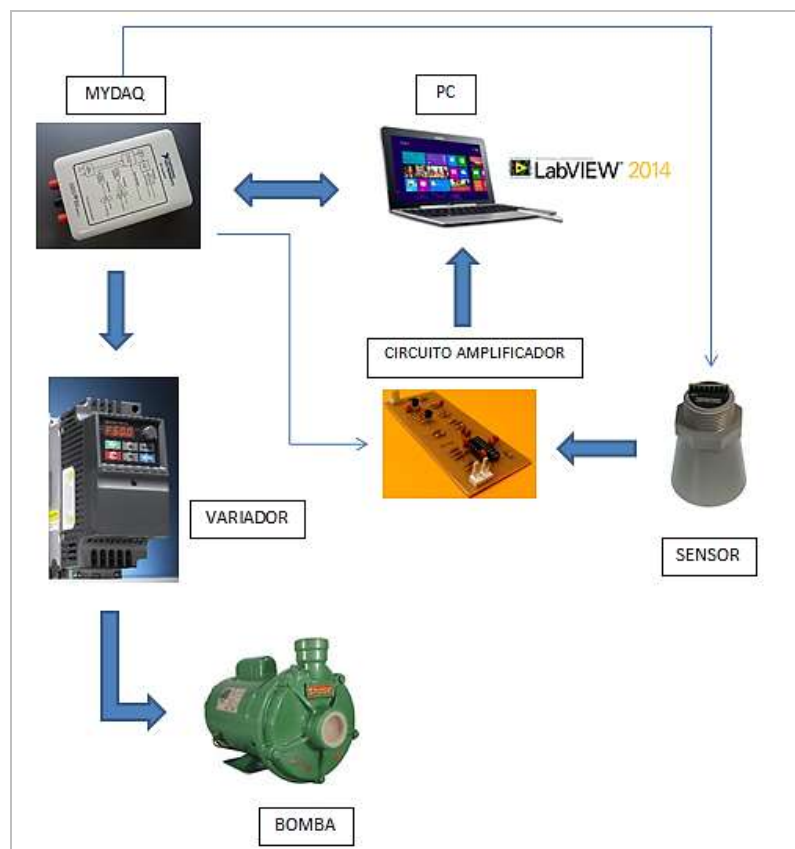


Figura 3. 44. Diagrama Esquemático del Sistema de Control de Nivel

3.8.3 Etapa de acondicionamiento para el sensor de nivel

La etapa de acondicionamiento es la encargada de proporcionar una señal apta en voltaje y corriente a la tarjeta MyDaq. Permite corregir, filtrar, aislar y ajustar la señal enviada por el sensor de nivel.

En la siguiente figura 3.45 se muestra en forma de diagramas de bloques las etapas de división, acondicionamiento, conversión acondicionamiento y presentación de los datos.

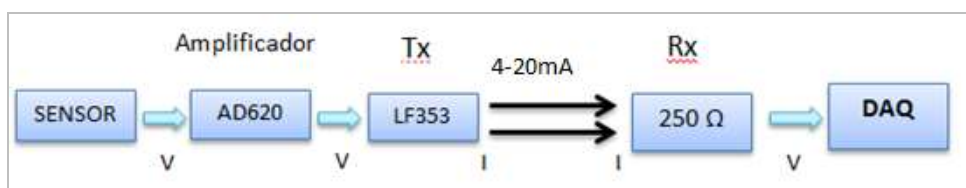


Figura 3. 45. Diagrama Esquemático del Acondicionamiento de la Señal

Para este sistema se ha dispuesto de dos etapas la primera es un Amplificador el cual amplificara la señal de voltaje entregada por el sensor, mediante un amplificador de instrumentación AD 620 (ANEXO R), el mismo que entra a un transmisor LF353 (ANEXO S) que se encarga de la transmisión de información a través del estándar de 4 a 20ma, la señal que sale del transmisor es de corriente la misma que finalmente entra a la segunda etapa que es la del receptor.

La segunda etapa es un Receptor que se encarga de recibir la señal ya amplificada de corriente para transformarla a voltaje mediante una resistencia de 250 Ω para que esta ingrese a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

En la figura 3.46 se observa el diagrama del circuito amplificador-transistor con los diferentes componentes electrónicos utilizados.

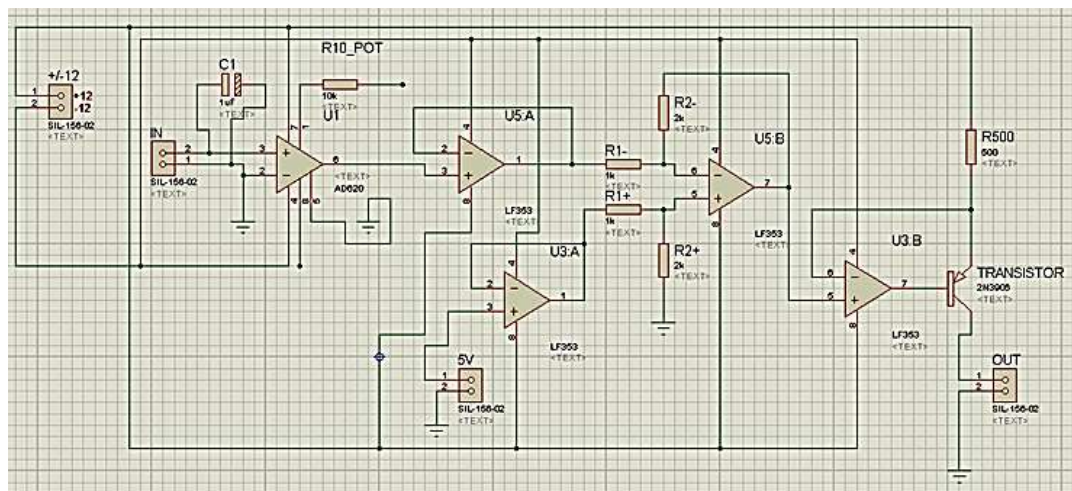


Figura 3. 46. Circuito de Simulación del Amplificador y Transmisor

Diseño de la placa:

Figura 3.47; 3.48; 3.49

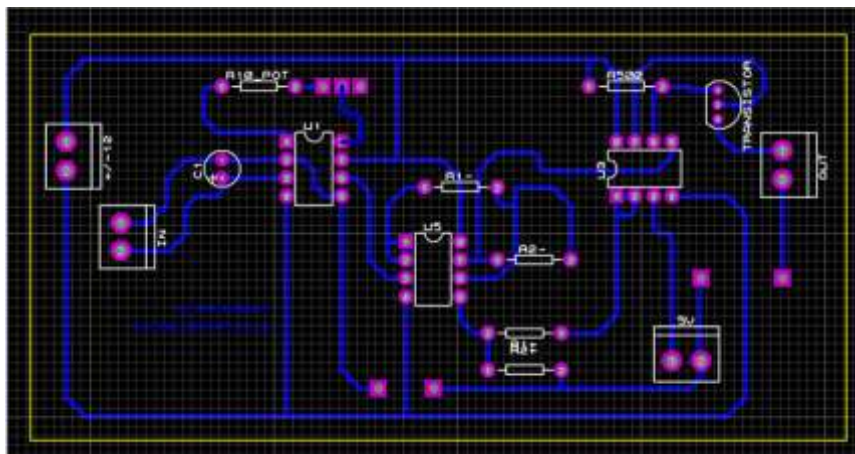


Figura 3. 47. Diseño de la placa Amplificador-Transmisor

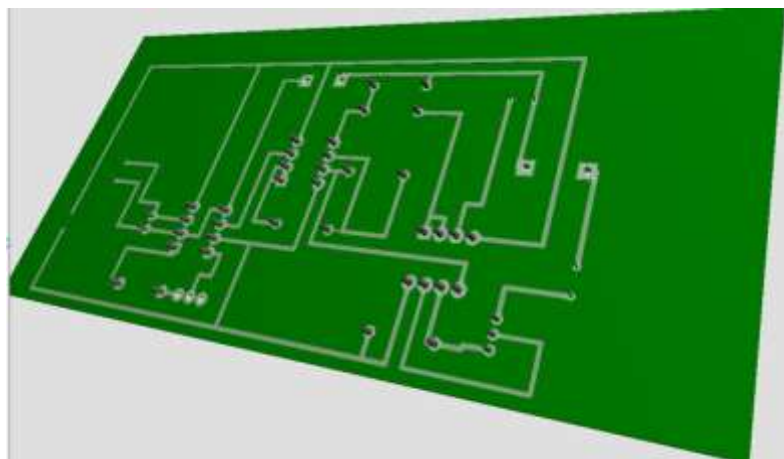


Figura 3. 48. Visualización de las pistas Amplificador-Transmisor en 3D

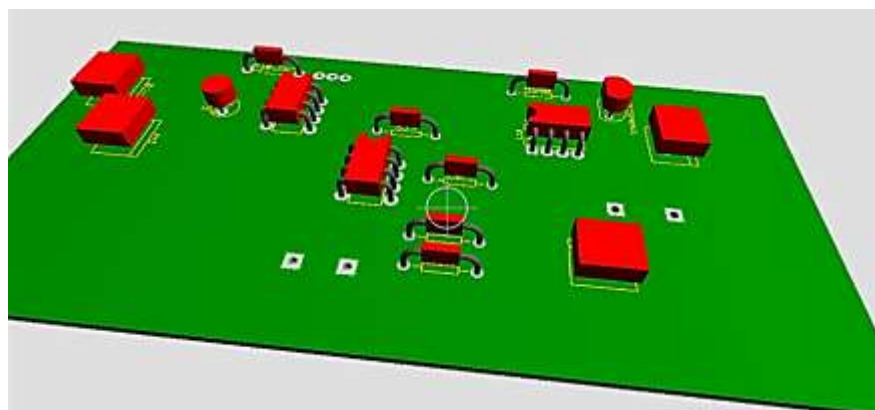


Figura 3. 49. Visualización de la placa Amplificador-Transmisor en 3D

3.8.4 Diseño del software para la adquisición de datos

En esta parte hablaremos de la programación de del panel, las variables de control que tiene, como la adquisición de datos, el procesamiento de la señal de entrada que le estemos aplicando al sistema; esta señal la procesa y la normaliza para mandarla finalmente a la tarjeta de adquisición de datos.

Para esto detallaremos los pasos:

- Abrimos un nuevo VI en blanco figuras 3.50 y 3.51.

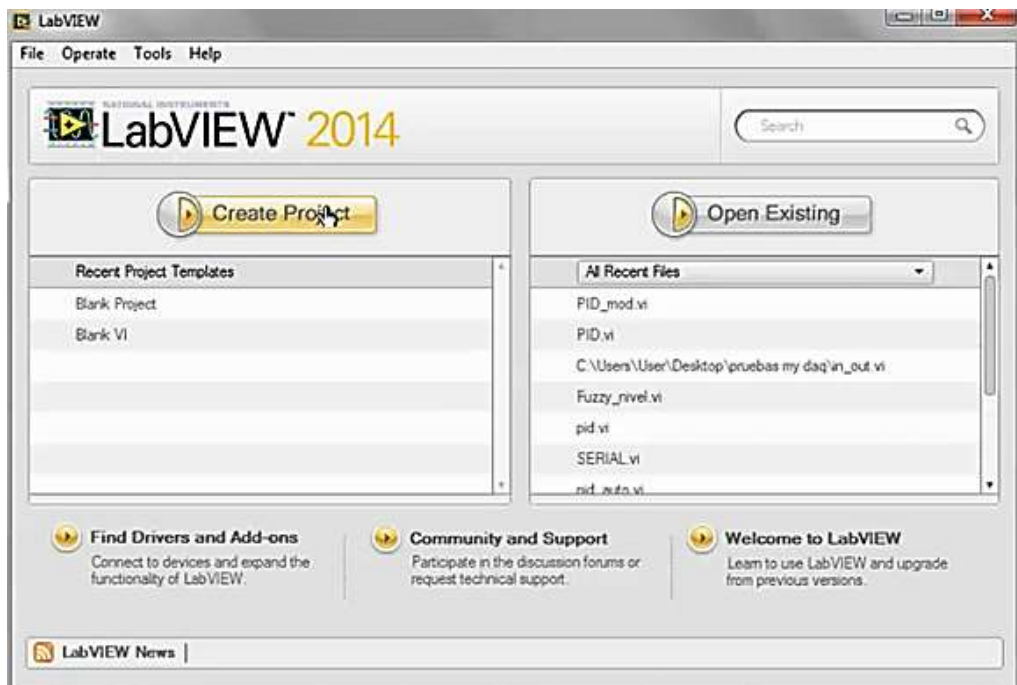


Figura 3. 50. Crear un proyecto

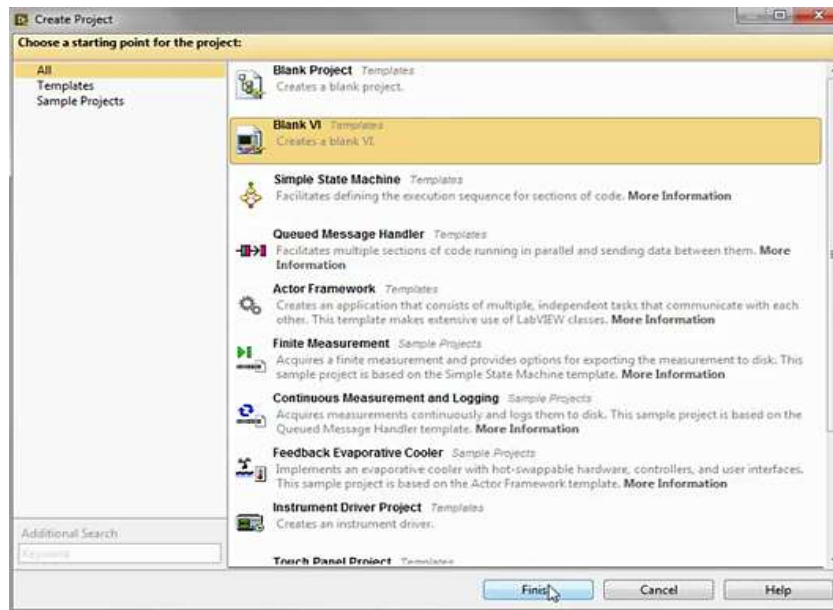


Figura 3. 51. VI Nuevo

- Creamos en el diagrama de bloques una estructura While Loop en: *Programming > Structures > While Loop* (figura 3.52), dar clic derecho en la esquina inferior derecho y crear una constante *Create Constant* (figura 3.53).

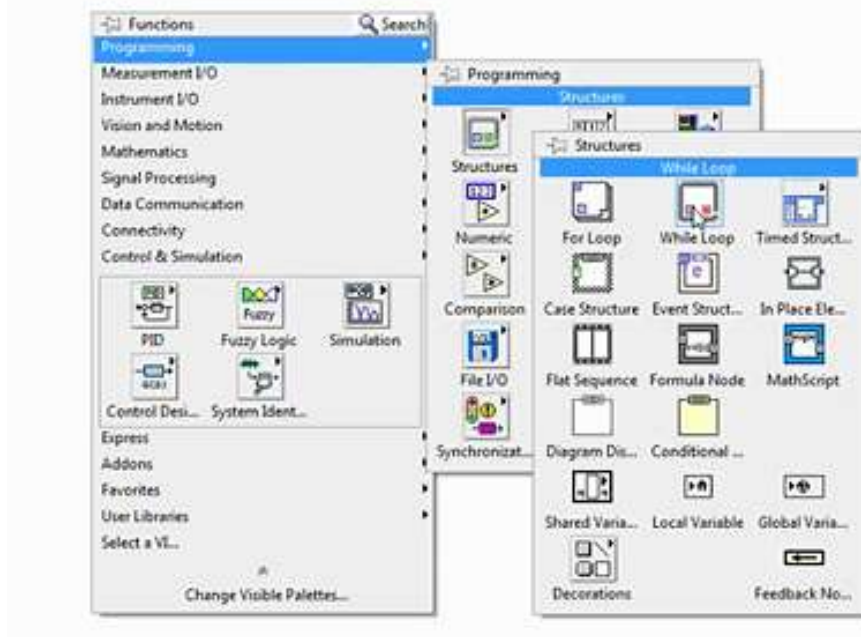


Figura 3. 52. Estructura While Loop

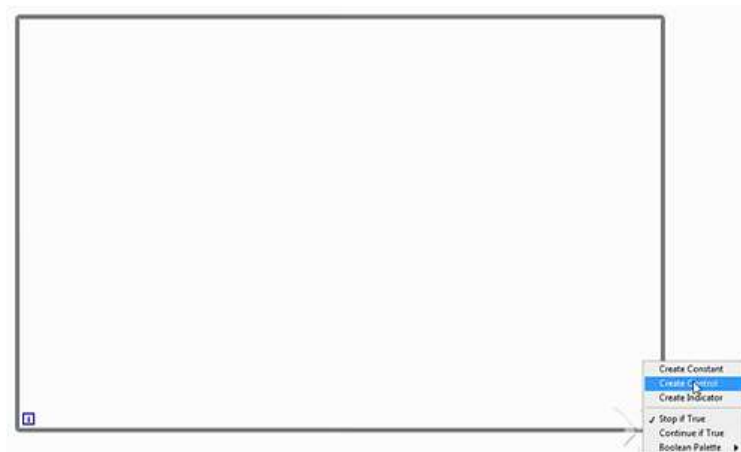


Figura 3. 53. Crear una Constante

- A continuación hacemos el escalamiento de la señal del sensor a litros que es la medida de volumen de nuestro tanque para el escalamiento de la señal utilizamos la ecuación de la recta ($y= mx+b$) donde están inmersos nuestros datos y_2 y y_1 (10,0) litros, y los datos de voltaje que arroja el sensor de 0 litros a 10 litros que corresponden a x_1, x_2 (1,53; 2,53) volts con los cuales sacamos la pendiente ($m=y_2-y_1/x_2-x_1$), con el resultado de la pendiente y los valores de x , obtenemos el valor del resto de variables que se encuentran en la ecuación de la recta (b) como de observa en la figura 3.54.

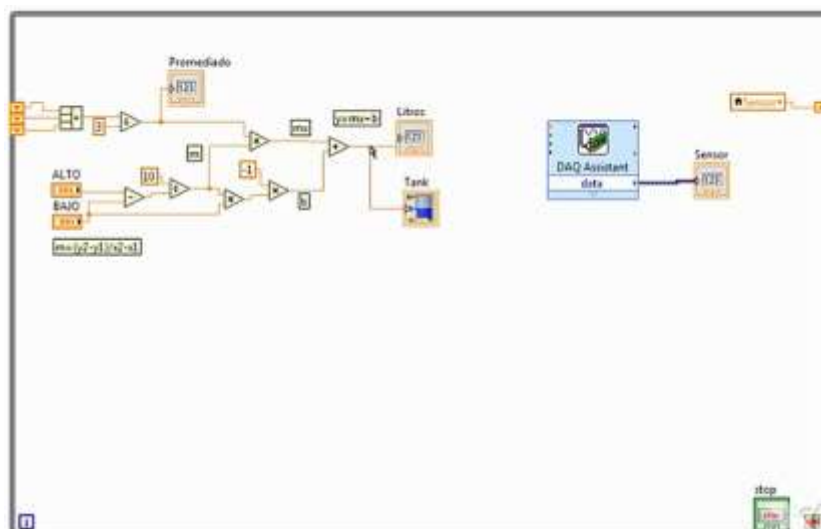


Figura 3. 54. Escalamiento de la señal

- Ahora se añade el DAQ Assistant: *Measurement >DAQmx-Acquisition> DAQ Assistant* (figura 3.55).

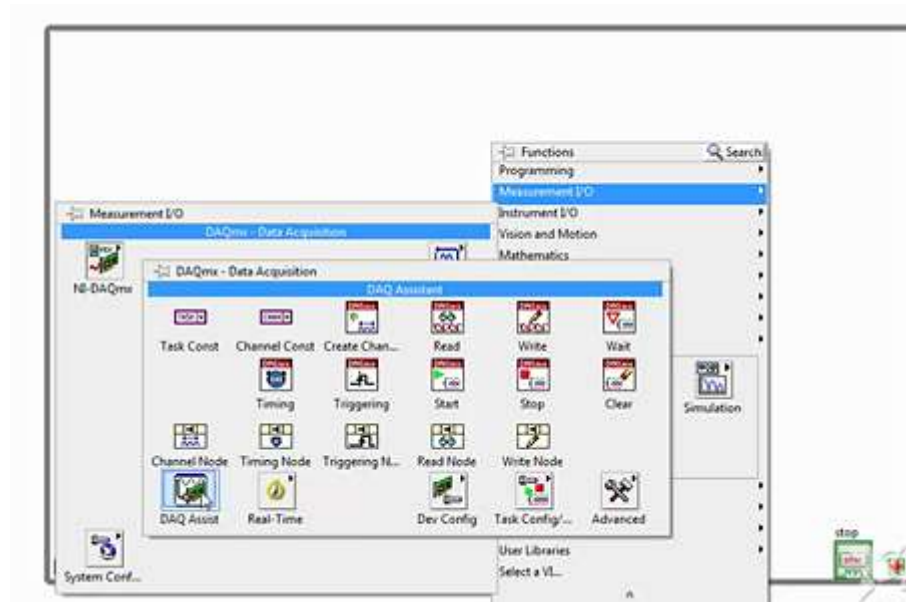


Figura 3. 55. Adquisición de la DAQ

- Damos doble clic en la DAQ Assistat para configurar los puertos de entrada de la misma, para recibir la señal de voltaje analógico proveniente del sensor *Acquire Signals > Analog Input > Voltage > a1*. (figura 3.56)

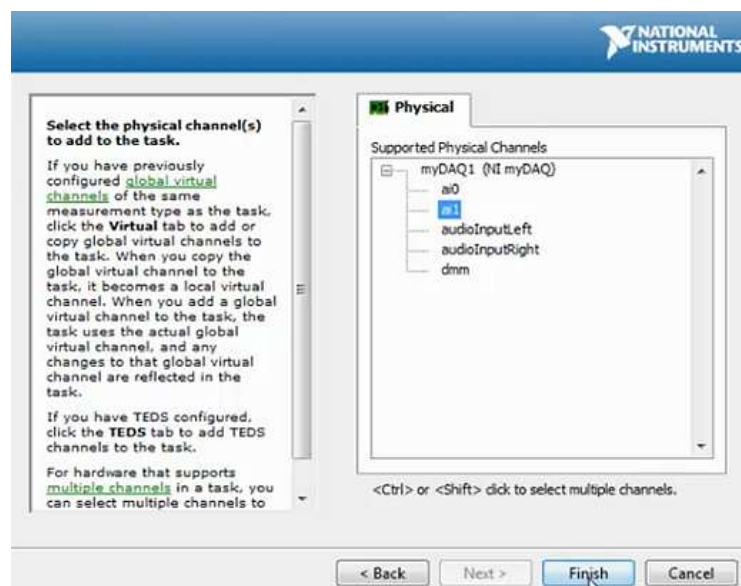


Figura 3. 56. Configuración de la DAQ Assistat

- Configuramos el rango de la señal de entrada como indica la figura 3.57.

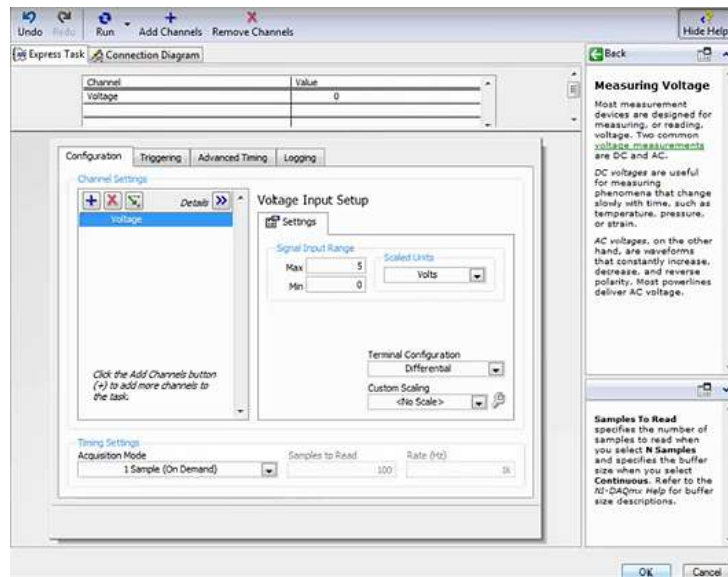


Figura 3. 57. Configuración de los puertos de entrada

- Creamos un indicador numérico para visualizar los datos de voltaje que arroja el sensor como indica la figura 3.58.

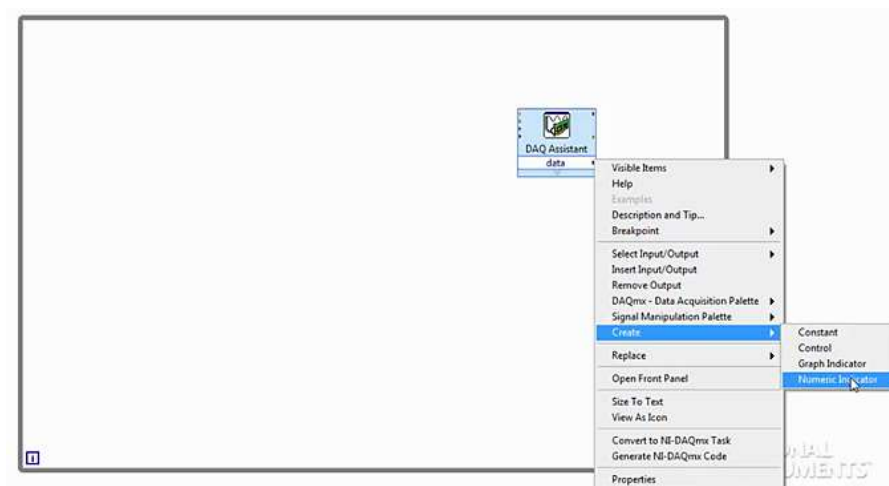


Figura 3. 58. Indicador numérico

3.8.5. Programación del Control Difuso en LabView 14.0.

El diseño del control difuso (*Fuzzy*) para la planta de nivel estudiada en el presente proyecto, consta de tres partes fundamentales, mencionadas anteriormente en el documento, y están son:

1. Fusificación
2. Reglas de inferencia
3. Defusificación

Dicho esto, damos inicio a la construcción del diseño de control difuso empleando el Toolkit de *Fuzzy Logic*, el mismo que se encuentra previamente instalado en la plataforma gráfica LABview 2014 figura 3.58.

- En el diagrama de bloques nos situamos en la barra de herramientas: *Tools > Control and Simulations > Fuzzy Systems Designer*. Como muestra la figura 3.59.

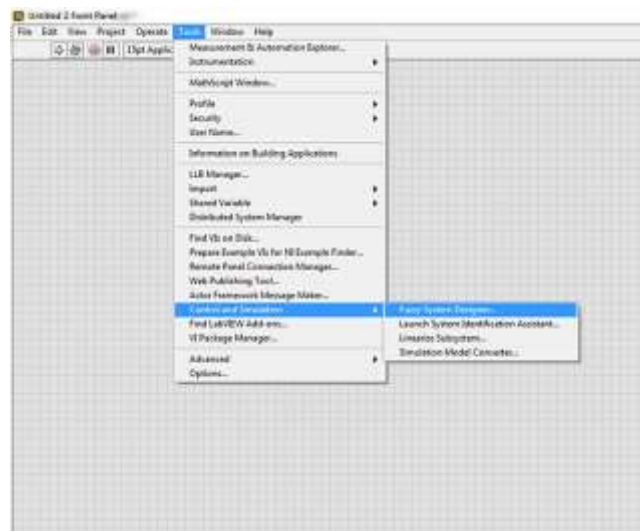


Figura 3. 59. Fuzzy Systems Designer

- Dentro del Fuzzy System Designer añadimos la variable(s) de entrada y salida (figura 3.60), en este caso se definieron como variable de entrada (ERROR) y variable de salida (SALIDA). Nos situamos en el

signo +, damos click para adicionar la variable de entrada (*Add Input Variable*)

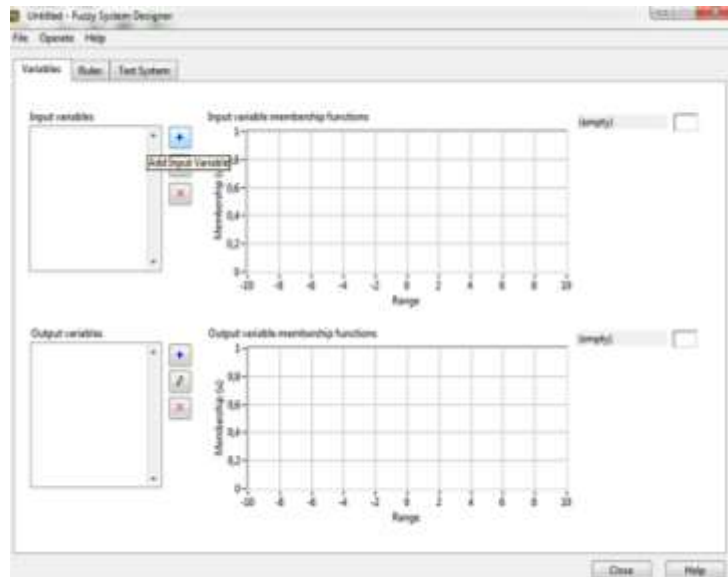


Figura 3. 60. Variables de entrada

- Al dar clic en + se despliega la ventana *Edit Variable*, dentro de esta, asignamos un nombre a la variable de entrada (ERROR), también se debe definir valores de rango y añadimos las funciones de membresía. Se adicionaron tres funciones de membresía para la variable **ERROR**: NEGATIVO, ZERO, POSITIVO con sus respectivos valores para cada una de las mismas; al definir todos los parámetros damos clic en OK para dejar sentado lo pre-establecido como indica la figura 3.61.

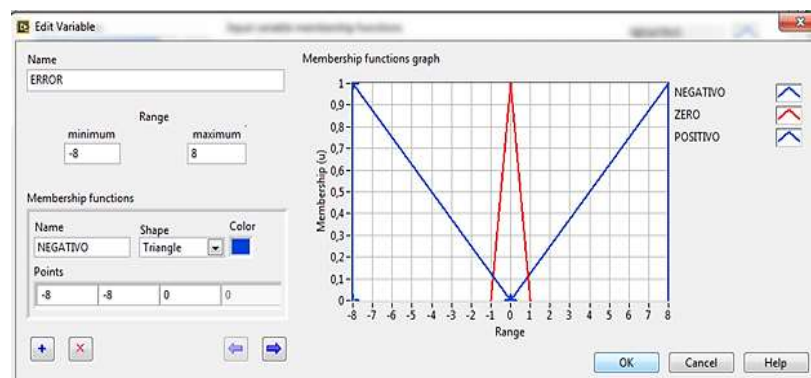


Figura 3. 61. Funciones de membresía

- El mismo procedimiento anterior, se debe realizar para definir la variable de salida (**SALIDA**), valores de rango y de las correspondientes funciones de membresía, obteniendo como resultado lo siguiente figura 3.62:

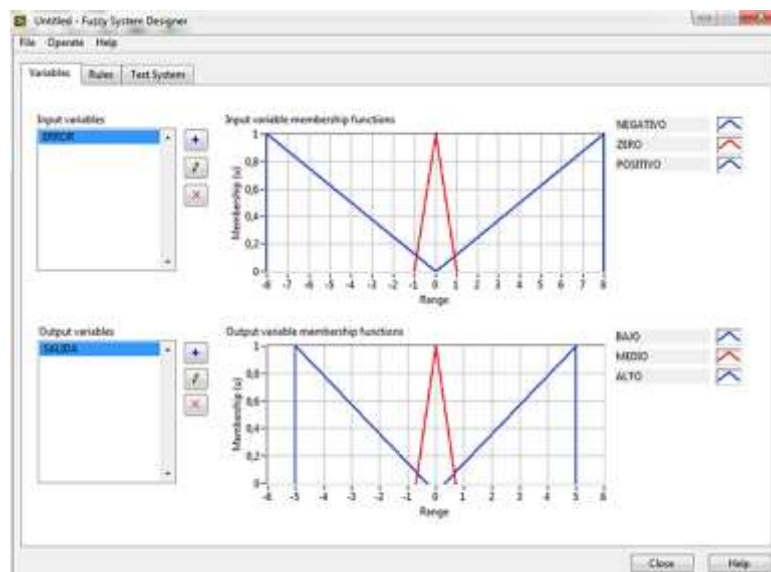


Figura 3. 62. Variable de salida

- A continuación, se establecen las reglas de inferencia entre variables.- Damos clic en el menú **Rules** y dentro de la pestaña se adicionan las mismas, el número de reglas dependerá del número de funciones de membresía asignadas para cada variable; en el mismo se crearon tres reglas de inferencia como indica la figura 3.63.

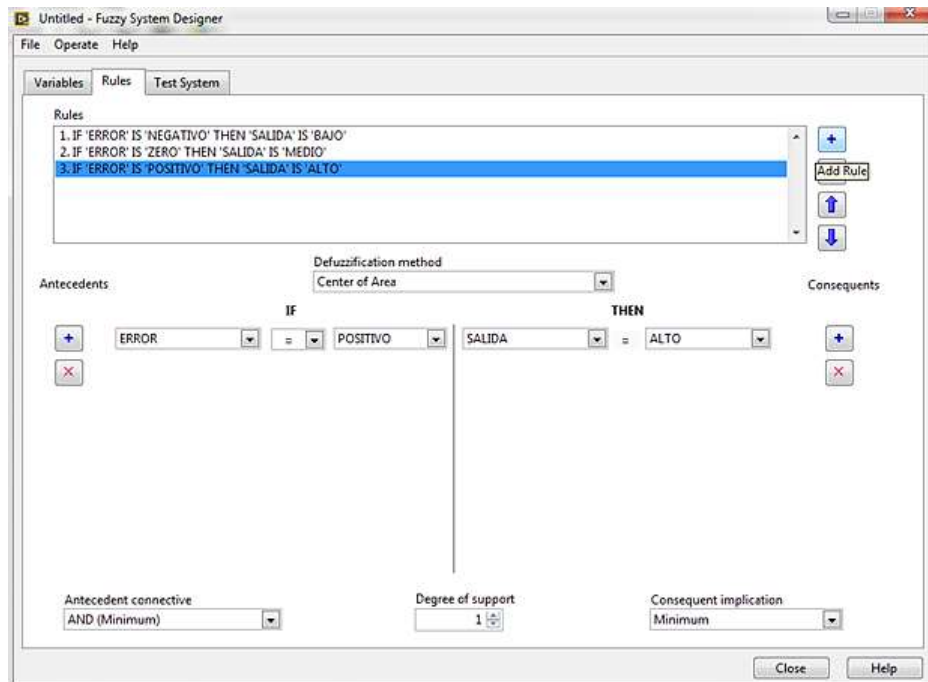


Figura 3. 63. Reglas de inferencia

- Es muy importante dentro de esta pestaña (**Rules**), condicionar de manera correcta las reglas de inferencia ya que de las mismas, dependerá el eficiente funcionamiento del control difuso.- Adicionalmente en la misma podemos seleccionar con que método de **DEFUSIFICACION** deseamos trabajar, para efecto de este proyecto se utilizó el método de MANDANI o CENTRO DE ÁREA figura 3.64.

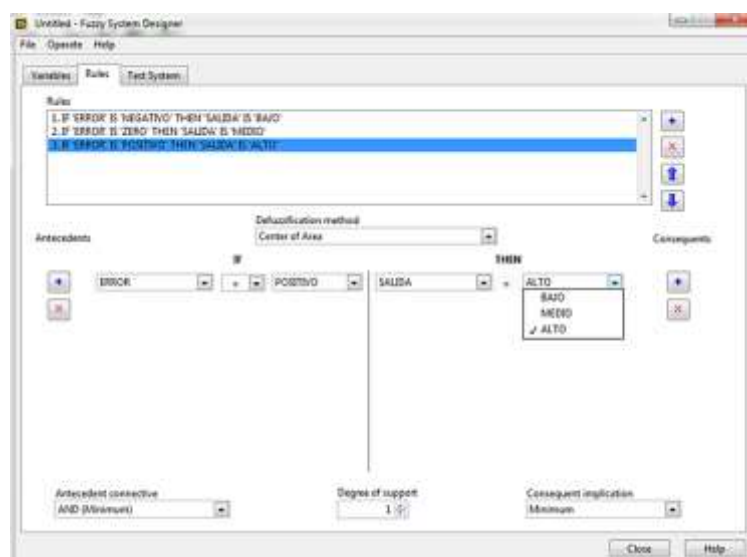


Figura 3. 64. Método de defusificación

- Junto a la pestaña (**Rules**), tenemos (**Test System**), el mismo sirve para visualizar la relación entre los datos establecidos en las dos variables, figura 3.65

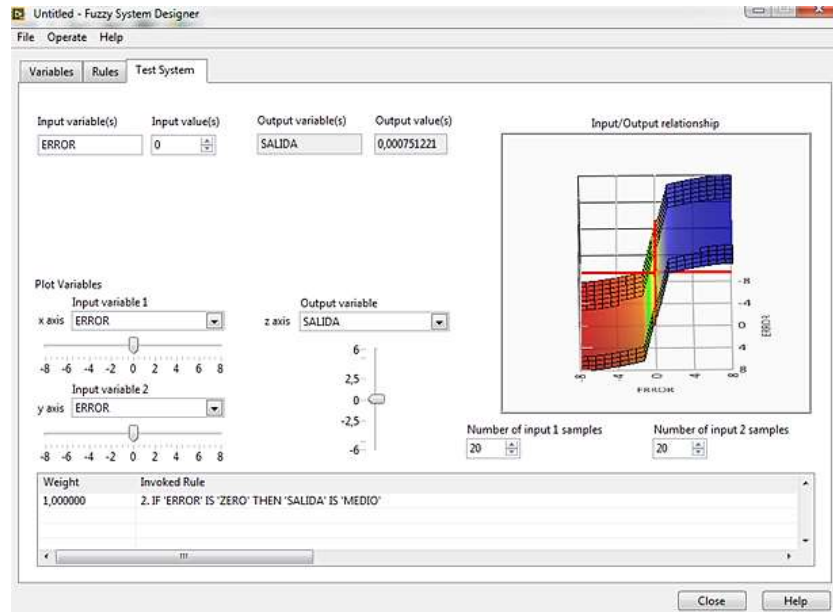


Figura 3. 65. Test systems

- Finalizada la inserción de datos a las variables y establecidas las reglas de inferencia entre ellas, se cierra el FUZZY SYSTEM DESIGNER, éste generará un archivo con extensión (*.fs) figura 3.66.

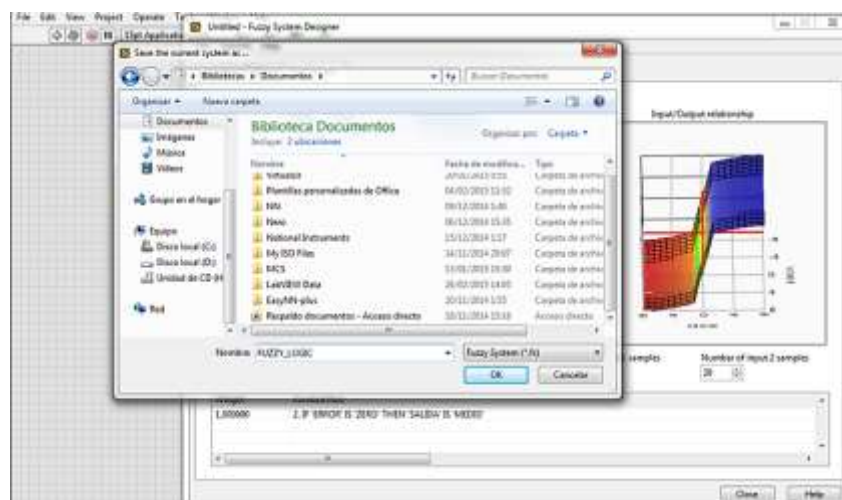


Figura 3. 66. Archivo (*.fs)

- Generado el archivo con extensión (.fs) se tiene listo el mismo, para luego mandarlo a llamar por medio de la herramienta prediseñada en el software (LABview-Fuzzy Logic) como se observa en la figura 3.67.

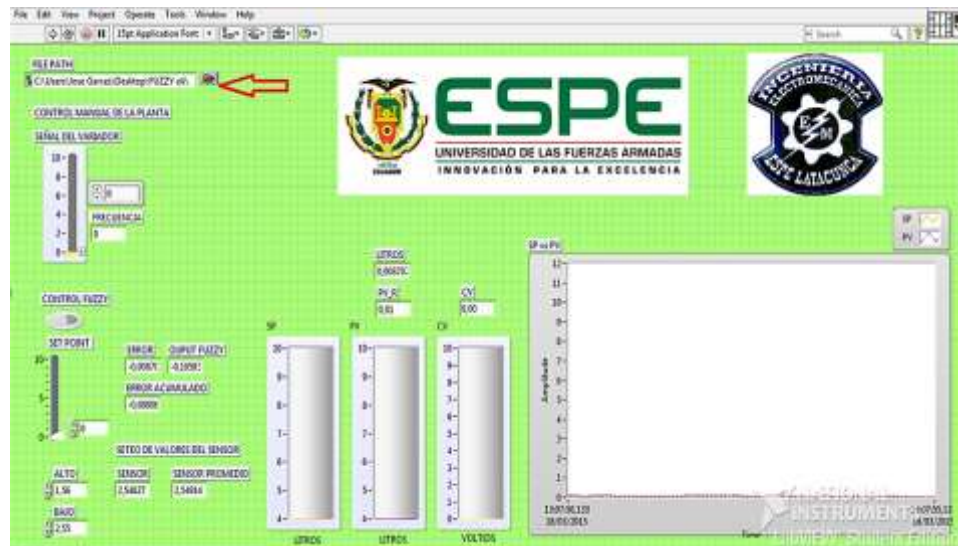


Figura 3. 67. File path

- Antes de llamar al archivo donde se encuentran las reglas de inferencia y sus variables pre-diseñadas, se debe construir el panel de control (VI) y diagrama de bloques del control difuso para la puesta en marcha del mismo y este se encuentra detallado a continuación en la figura 3.68:

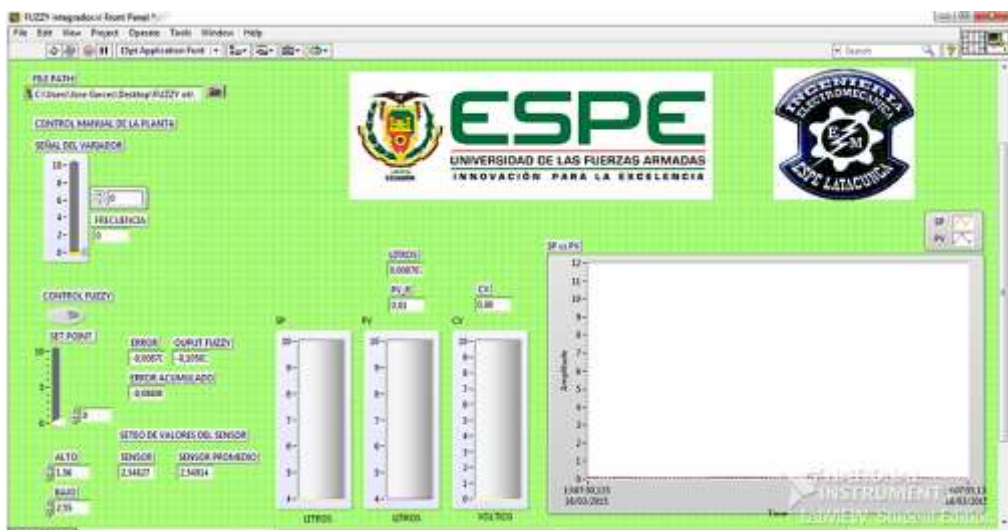


Figura 3. 68. Diagrama de bloques

Al realizar el diseño del panel de control, se debe tomar en cuenta el número de datos que se desea monitorear, visualizar o controlar dentro del mismo; en este caso, se insertaron controles numéricos, indicadores gráfico, numéricos, paletas de llamada, etc, los cuales permiten apreciar de mejor manera el proceso y funciones que desarrolla la planta de nivel tratada.

Dentro de los parámetros de diseño del panel de control VI, se colocó una paleta de llamado o búsqueda de archivo o (File Path) como se observa en la figura 3.67, en la que se puede insertar el archivo (*.fs) anteriormente citado, simultáneamente se colocaron tanques gráficos para monitorear el Set Point (SP) del tanque a controlar, Process Value (PV), Control Value (CV), además una gráfica donde se puede visualizar el comportamiento de cada una de las variables de interés en la planta, en este caso, se tomaron los valores del (SP y PV) para analizar su comportamiento.

Dentro del panel de control VI se realizó dos controles, el primero de ellos es de modo manual, donde el usuario puede variar mediante un slider el voltaje que envía a la bomba para suministro de agua al tanque a controlar y el segundo control, es de modo automático, es decir donde se encuentra propiamente inmerso el *Fuzzy Logic* como método de control; dentro del mencionado cabe destacar que se muestran también los valores del Error dentro del Fuzzy Control, ya que el mismo influye directamente en el comportamiento de la variable de proceso de la planta .

Es importante destacar que de igual manera se pueden visualizar los valores de voltaje que arroja el sensor ultrasónico, así como también se puede manipular los valores de seteo del mismo para que se inicialicen predeterminadamente al correr el programa de control; estos valores de seteo no son otra cosa que los valores mínimo y máximo (volts) que arroja el sensor al momento en que el agua o n líquido alcanza la altura máxima o

mínima del tanque; dicho esto y al tanto de que son los valores de seteo, podemos tomar los mismos para realizar el escalamiento de la señal del sensor (Volts) a unidades de volumen (Litros) que serán utilizadas para medir el nivel en el tanque como se observa en la figura 3.69.

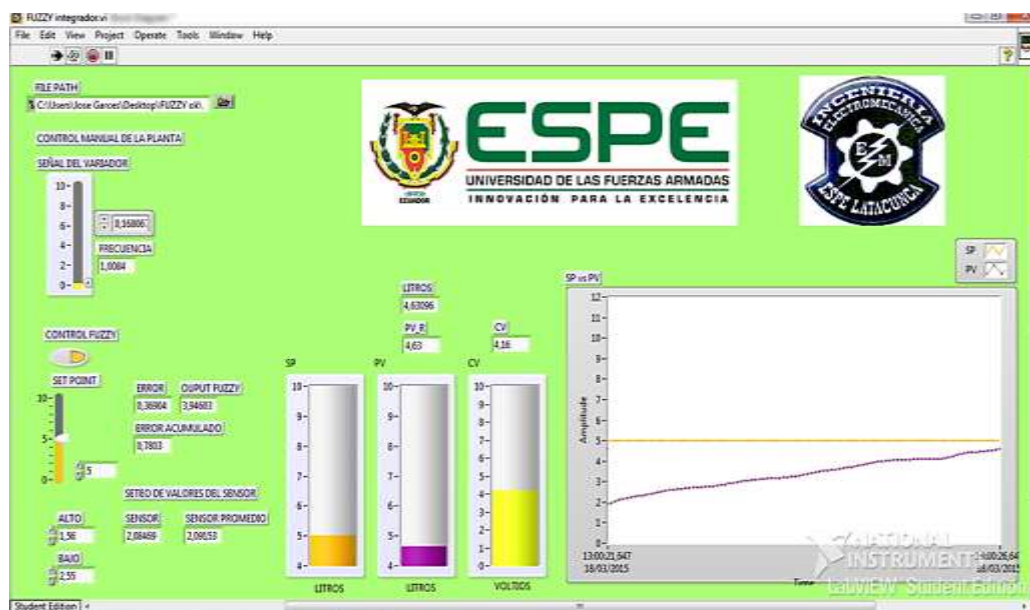


Figura 3. 69. Programa puesto en marcha

- En la figura 3.70 se puede observar la estabilización de la señal del sensor (color lila) con respecto al Set-point (color naranja).

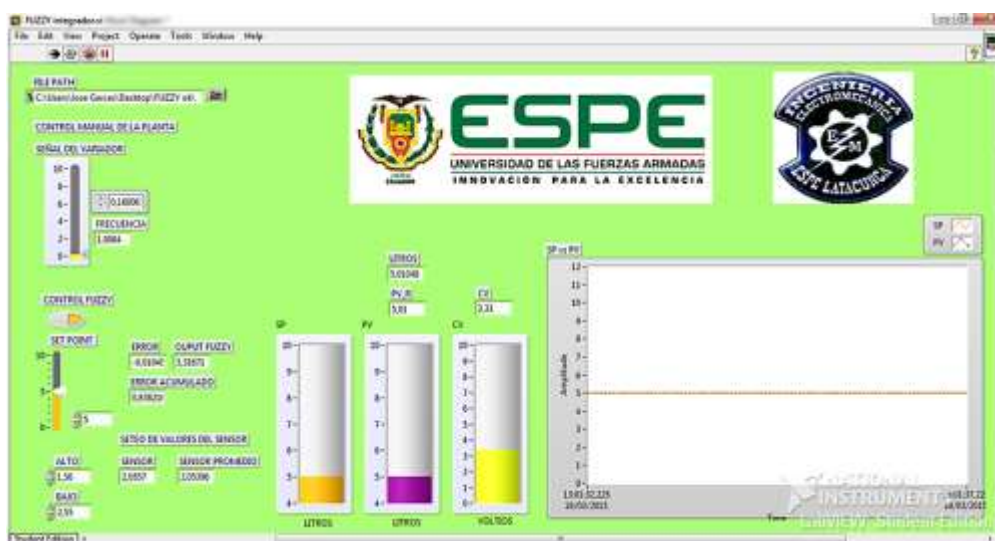


Figura 3. 70. Estabilidad de la señal

3.8.6. Programación del Panel Frontal de Control.

El código completo asociado a la interface gráfica se puede observar en la figura 3.71:

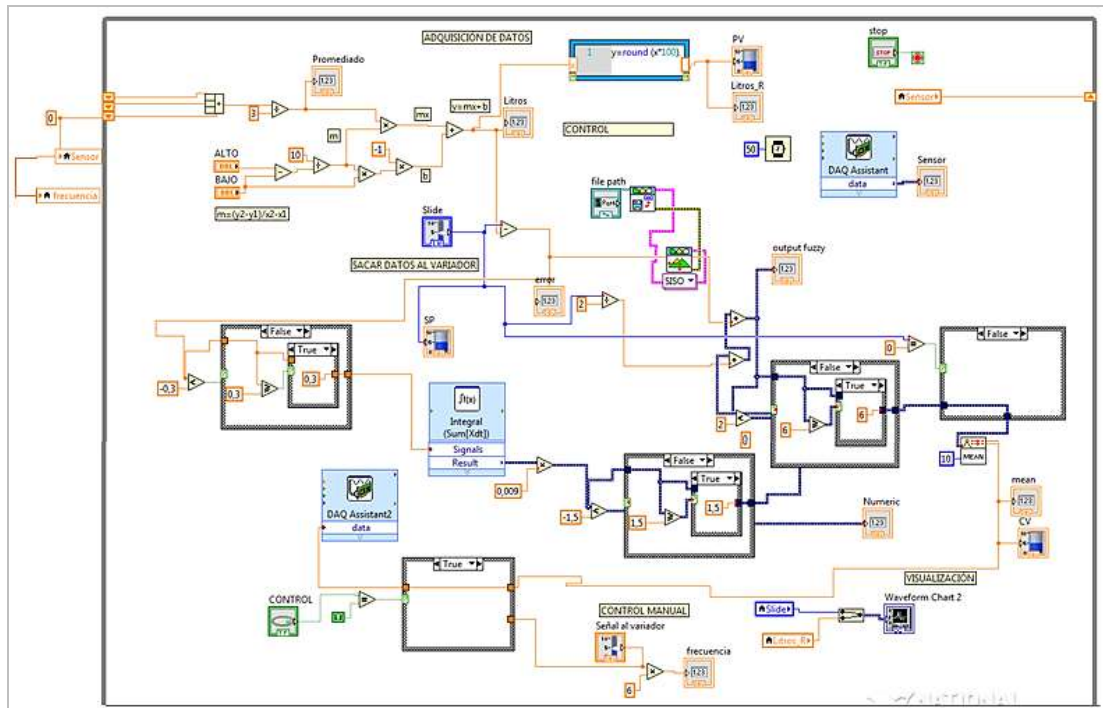


Figura 3. 71. Código completo de la interfaz Labview 14.0

3.8.7. Herramientas del Control Difuso

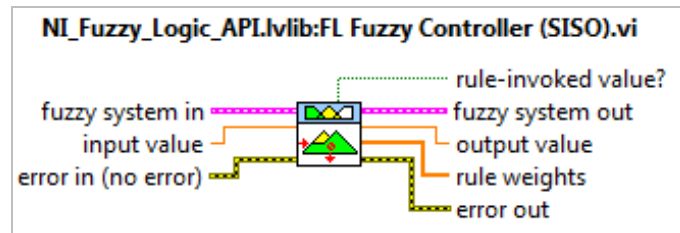


Figura 3. 72. Load Fuzzy System

Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona una funcionalidad de error fuera de serie (figura 3.72).

Error in: Describe las condiciones de error que se producen antes de este nodo se ejecuta. Esta entrada proporciona error estándar en la funcionalidad.

Fuzzy system out: Devuelve la información completa para un sistema difuso. Convierte esta salida del sistema difuso en entrada de otro VI.

Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona una funcionalidad de error fuera de serie.

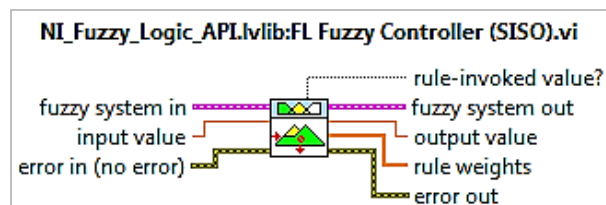


Figura 3. 73. Fuzzy Controller

Fuzzy system in: Especifica la información completa para un sistema difuso. Conecte el sistema difuso a cabo la producción de otro VI del sistema difuso en la entrada de esta VI (figura 3.73).

Input value: Especifica el valor de la variable de entrada en el sistema difuso. El controlador de lógica difusa evalúa el valor (s) de salida de acuerdo con el valor de entrada y las reglas del sistema difuso.

Error in: Describe las condiciones de error que se producen antes de este nodo se ejecuta. Esta entrada proporciona error estándar en la funcionalidad.

Rule-invoked value?: Indica si el controlador de lógica difusa invoca una norma para evaluar el valor de salida correspondiente. El valor de salida es cero o bien si el controlador difuso evalúa la variable de salida a cero en función del valor (s) de entrada y las reglas del sistema difuso o si el controlador de lógica difusa no invoca ninguna regla para evaluar la magnitud de salida. **Rule-invoked value?**, indica cuando es falso que la base de reglas es incompleta.

Fuzzy system out: Devuelve la información completa para un sistema difuso. Cablear **Fuzzy system in** en la entrada de otro VI.

Output value: Devuelve el valor de la variable de salida en el sistema difuso. El controlador de lógica difusa evalúa el valor de salida de acuerdo con el valor (s) de entrada y de las reglas del sistema difuso. Si el valor de salida es cero, utilice el valor de normas invocadas, para determinar si el controlador difuso evaluó la variable de salida correspondiente a cero o si el controlador de lógica difusa no invoca ninguna regla para evaluar la variable de salida.

Rule weights: Devuelve los pesos de regla que el controlador de lógica difusa utiliza para escalar las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas de salida. El método implica especificar cómo el controlador de lógica difusa realiza esta escala. Para cada regla, el peso de la regla es el

valor de verdad del antecedente agregado multiplicado por el grado de apoyo que se especifique para la regla.

Error out: contiene información de error. Esta salida proporciona una funcionalidad de error fuera de serie.

3.8.8. Programación del Control Neuronal

a) Diseño y entrenamiento de la red.

Ésta etapa está basada en la selección de una red que posea las características apropiadas para su implementación en el modelo de la planta de proceso virtual, como son: su topología, su tipo de aprendizaje, y la forma en que presenta la salida.

b) Elaboración del modelo de proceso.

El modelo es desarrollado por medio de Matlab, utilizando una de sus herramientas (Simulink). Es construido a partir de la visualización de los datos obtenidos en la primera etapa e implementando la red neuronal.

Para realizar este tipo de programación lo primero que debemos obtener son las variables de entrada y salida, en nuestro caso como variable de entrada es el Nivel (litros) y como salida es el Voltaje de la DAQ en (Voltios) como se puede apreciar en la tabla 3.9

Tabla 3. 9

Datos de las variables (Entrada y Salida)

ENTRADA: NIVEL(Litros)	SALIDA: DAQ (Voltios)
4	3,163
5	3,369
6	3,31
7	3,568
8	3,643
9	3,7399
10	3,915

c) Análisis de Resultados

La siguiente figura 3.74 muestra la gráfica que se obtiene de tomar los valores de la tabla anterior, la misma sirve para mostrar el comportamiento del nivel del tanque 2 (en litros) con respecto a los datos de salida (Voltios), comprobando que el nivel y los voltios de salida son aproximadamente proporcionales, es decir ambos disminuyen con respecto al tiempo de una manera proporcional

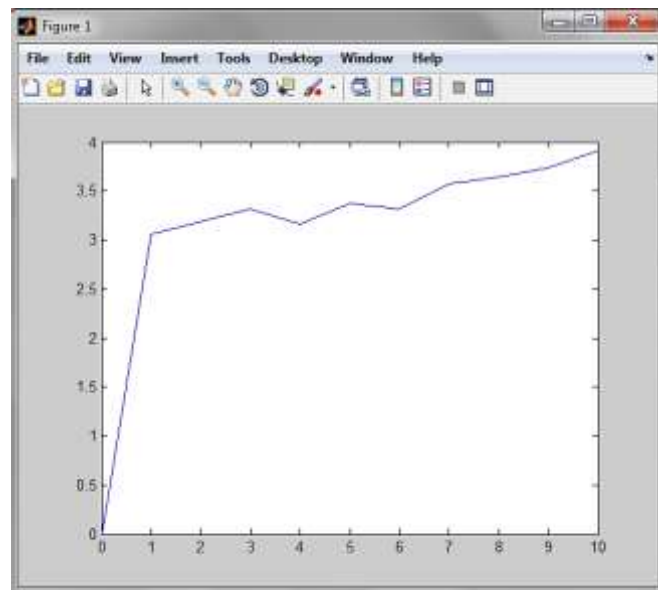


Figura 3. 74. Gráfica Nivel vs Voltios

Fuente: Matlab

3.8.9. Implementacion de la Red Neuronal

La red neuronal a implementar es generada desde M-file de Matlab, en donde se usa el código mostrado en las siguiente figura 3.75.

```
x=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10]; % Valores del nivel en Litros
y=[0 3.055 3.19 3.31 3.163 3.369 3.31 3.568 3.643 3.7399 3.915]; % Valores de la DAO en Voltios .
plot(x,y) % Comando de Matlab que genera la figura
% 3.2 con los valores de x 4 y
% Instrucciones para la generación y entrenamiento de la Red Neuronal
p=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10]; % Vector entrada, el cual esta constituido
% por los valores del nivel.
t=[0 3.055 3.19 3.31 3.163 3.369 3.31 3.568 3.643 3.7399 3.915]; % Vector de salida, el cual contiene los
% valores de la DAO en voltios de salida.
% El comando newff genera e indica las capas y el tipo de entrenamiento
% con el cual se forma la Red Neuronal. Donde:
% Los valores que toma la Red Neuronal son los valores mínimos y máximos
% (0-10 mm) de la matriz p, mientras que la función de transferencia
% en la capa oculta es la tan-sigmoidal (tansig) y en la capa de salida
% la función de transferencia es lineal (purelin), por ultimo el algoritmo
% de entrenamiento es Levenberg-Marquardt (trainlm).
net = newff([0 10],[10 1],('tansig','purelin'),'trainlm');

y1 = sim(net,p); % Este comando guarda todos los datos generados, para
% el uso futuro de ellos en Simulink.
net.trainParam.epochs = 200; % Indica el numero de capas con la que se
% genera la red.
net.trainParam.goal = 0.001; % Indica el valor de corrección de error
% que tendro la red.
net = train(net,p,t); % El comando train, entrena a la Red Neuronal
% con los datos proporcionados anteriormente.
y2 = sim(net,p); % Guarda los nuevos valores de la Red Neuronal después
% del entrenamiento en Simulink.
plot(p,t,p,y2) % Genera la grafica de la Figura 3.5
gensim(net,1) % Comando que genera la Red Neuronal en Simulink.
```

Figura 3. 75. Código de Entrenamiento

Fuente: Matlab

Primeramente, para generar la matriz de entrada es necesario definirla, por medio de un vector 1x7 conformado por los valores de la tabla 3.9 primera columna

Vector de entrada

ENTRADA	CODIGO EN MATLAB
NIVEL	p=[4 5 6 7 8 9 10]

Una vez definida la entrada (p), se define el objetivo, que es el vector de salida conformado por los valores que se obtuvieron de los valores de voltaje de salida para cada nivel (segunda columna de la tabla 3.9). El código se muestra a continuación.

Vector de salida

SALIDA	CODIGO EN MATLAB
VOLTIOS	t=[3,163 3,369 3,31 3,568 3,643 3,7399 3,915]

Definidas las entradas y la salida, se genera la red ya seleccionada, por medio del código mostrado en la siguiente tabla 3.10.

Tabla 3. 10

Código Matlab

CODIGO EN MATLAB
<pre>net=newff([4 10],[x y],{' tansig'purelin'}, 'trainlm');</pre>

Con esta función se crea una red de tres capas. En la primera capa se tiene un vector de entrada de un elemento, en la segunda se tiene una capa oculta con 8 neuronas y en la capa de salida hay una neurona (Fig 3.76). Los valores que toma la red son los valores maximos y minimos (10-4) litros de la matriz de entrada P . La función de transferencia en la capa oculta es la tan-sigmoidal (tansig) y en la capa de salida la función de transferencia es lineal (purelin). El algoritmo de entrenamiento es Levenberg-Marquardt (trainlm).

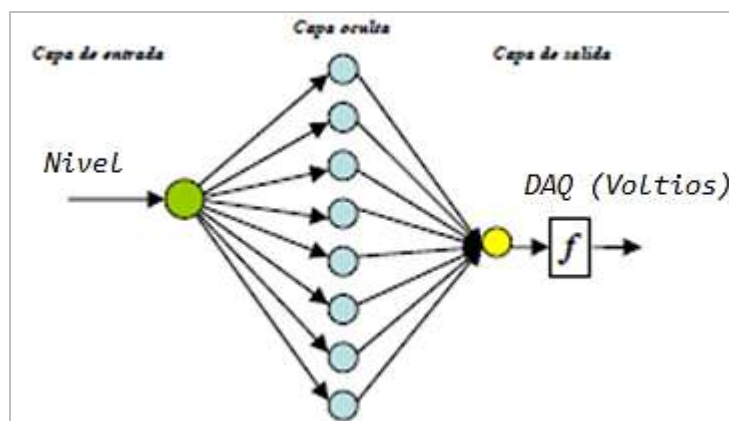


Figura 3. 76. Topología de la Red Neuronal

Fuente: Matlab

3.8.10. Entrenamiento de la red

Una vez generada la red, comienza a entregar valores aleatorios a los pesos, para lograr que la red responda a los objetivos planteados es necesario entrenarla, en la figura 3.77 se observa una ventana donde se van a generar las gráficas. En la tabla 3.11 se muestra el código de entrenamiento de la red, el cual se genera en 200 épocas, y lo hace por medio de la corrección del error entre las iteraciones de 0.001. El entrenamiento genera una gráfica, mostrada en la figura 3.78, en la cual se observa el decremento del error, que va desde un valor de 10^2 hasta 10^{-3} .

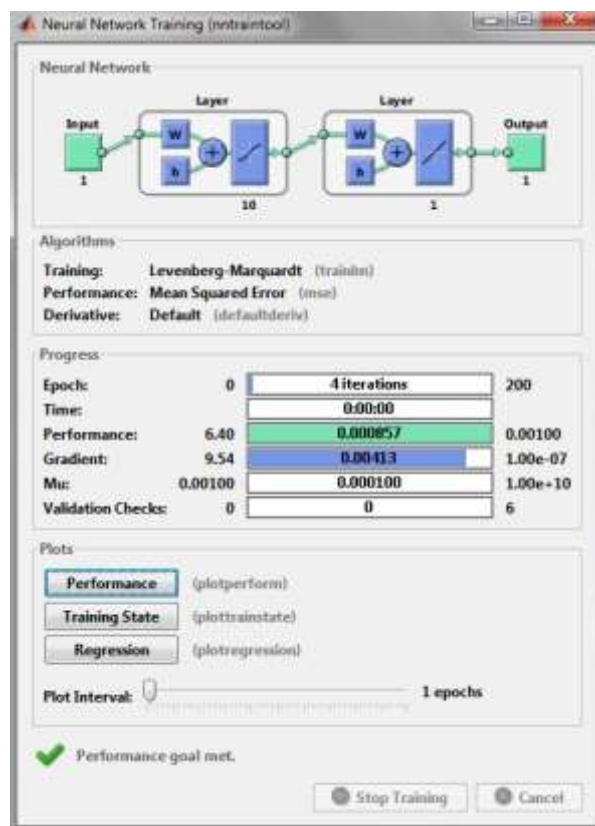


Figura 3. 77. Neuronal Network Training

Tabla 3. 11

Entrenamiento de la red

```
CODIGO EN MATLAB  
net=train(net,p,t);
```

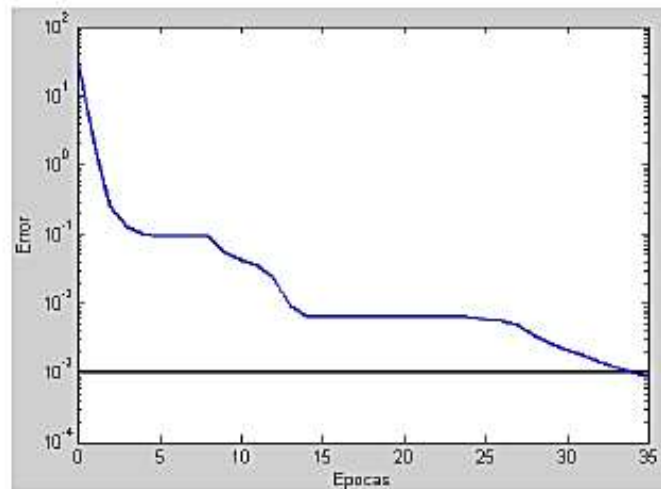


Figura 3. 78. Entrenamiento de la Red Neuronal

3.8.11. Validación de resultados

Una vez entrenada la red, para verificar los resultados que se esperan obtener, se crea el siguiente código, mostrado en la tabla 3.12

Tabla 3. 12

Simulación de la red

CÓDIGO EN MATLAB

```
y2=sim(net,p);
plot(p,t,p,y2)
```

Por medio del código anterior se genera en Matlab la gráfica mostrada en la Fig 3.79, donde se compara la respuesta de la red con la respuesta experimental.

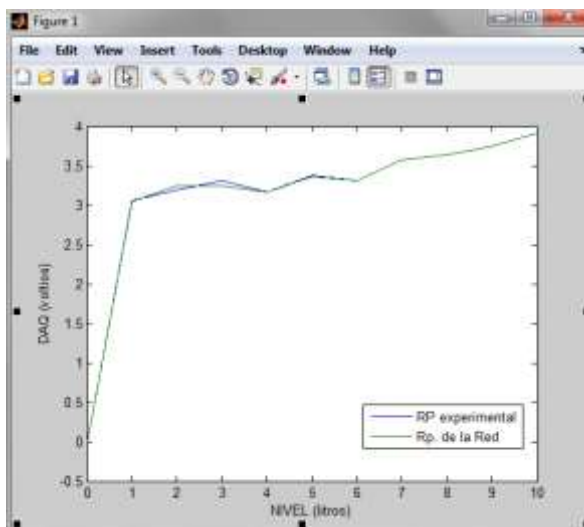


Figura 3. 79. Comparación de curvas experimental y simulada

3.8.12. Generación de la red neuronal en simulink

Una de las ventajas que ofrece Matlab es generar la red obtenida en Simulink esto es mediante el código mostrado en la tabla 3.13, la red neuronal formada por dicho código es mostrada en la figura 3.80

Tabla 3.13

Generación de la red en Simulink

CÓDIGO EN MATLAB
gensim(net,1)

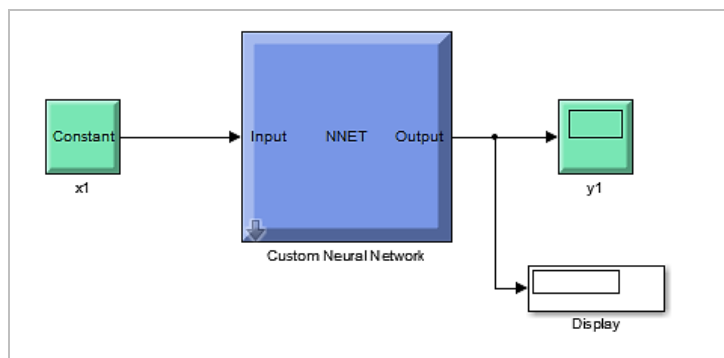


Figura 3. 80, Representación gráfica de la red neuronal

3.8.13. Validación de resultados de la red neuronal en simulink

Para la comprobación del correcto funcionamiento de la red generada con los datos de la tabla , se propone una entrada (nivel) de 5 litros, por lo que se debe entregar la red como salida (voltaje de salida) 3,03 Voltios (de acuerdo con la tabla 3.9). La respuesta que entrega la red se aprecia en la figura 3.81

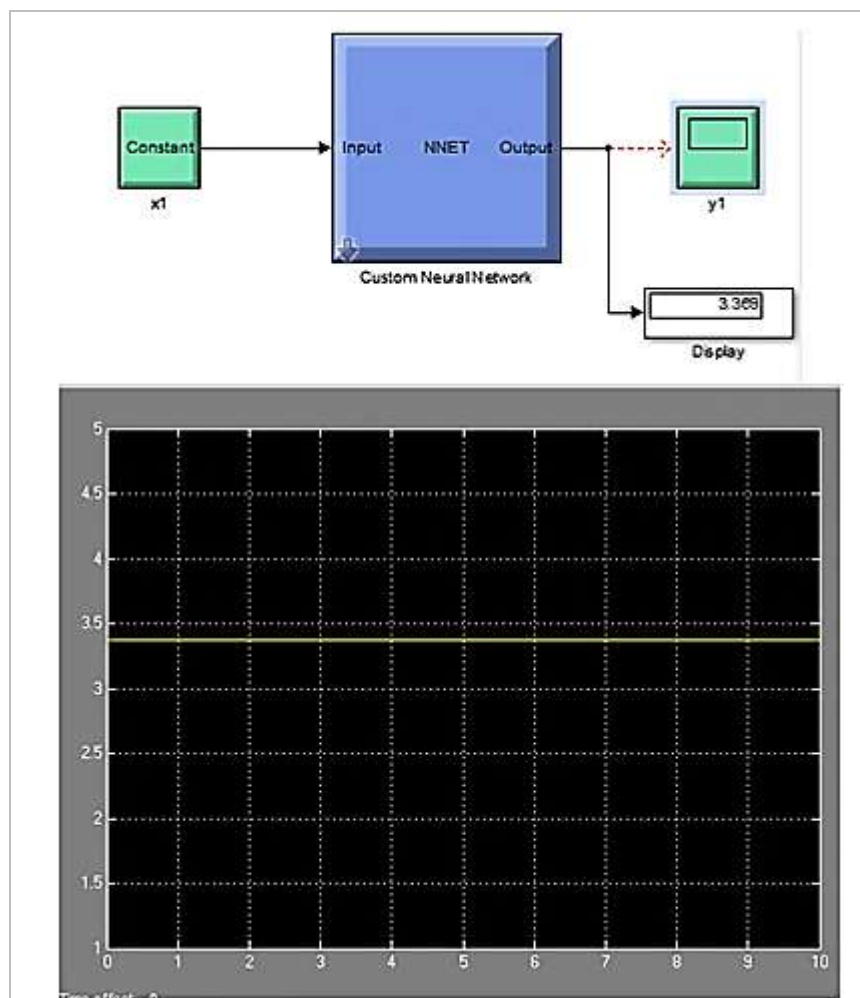


Figura 3. 81. Gráfica de la entrada con respecto a la salida

3.8.14. Simulación del proceso de nivel con la red neuronal

Comprobada la eficiencia de la red neuronal, se elabora el diagrama en Simulink (Fig.3.82), el cual simulará el proceso de la planta de nivel, en este diagrama se implementa también la red neuronal generada anteriormente.

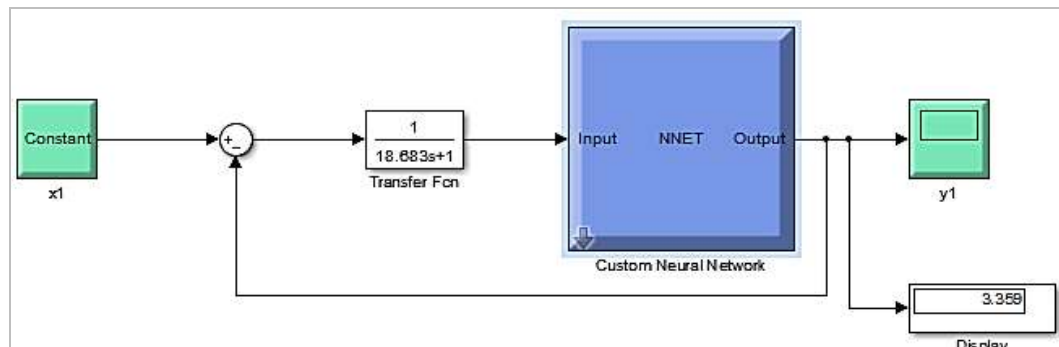


Figura 3. 82. Diagrama del proceso de la planta de nivel.

La figura anterior, genera el comportamiento de la planta de nivel, la descripción del diagrama anterior es la siguiente:

1. Se tiene un bloque (Flujo de entrada), en el cual se introduce el valor del flujo (en Litros). Ejemplo 5 litros.
2. La salida del bloque (Flujo de entrada) entra a un punto (suma), en el cual su valor es restado por el valor de salida (flujo de salida) que entrega el bloque de la red neuronal, que está en función de la entrada que esta reciba, obteniéndose una diferencia de flujos.
3. De la salida del punto suma entra al bloque del (Modelo de la planta). Posteriormente de la salida del bloque del (Modelo de la planta) entra al bloque de la (Red Neuronal), que está en función de los litros de entrada que esta reciba, obteniéndose la señal de voltaje como salida.
4. La salida del bloque de la (Red Neuronal), entra a un osciloscopio para ver la gráfica del proceso. Ejemplo figura 3.83.

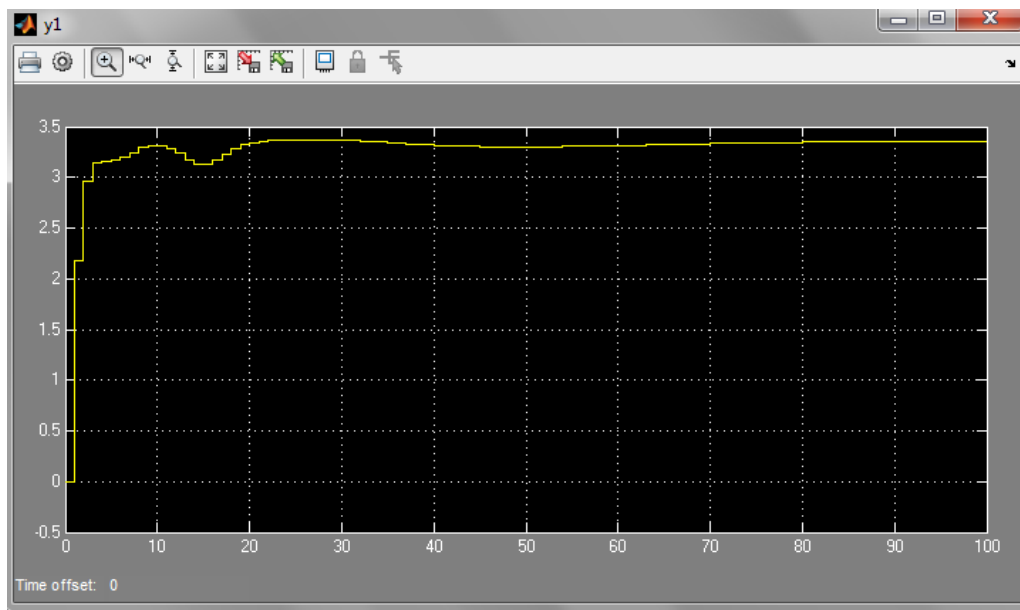


Figura 3. 83. Gráfica del proceso de la planta de nivel Ej. Para 5 litros.

Finalmente colocamos un Display para visualizar el valor de salida figura 3.83, el mismo que será comprobado con la Tabla 3.9, para este ejemplo nos visualizó 3.359 voltios, ya que el valor exacto es 3.36 concluimos que la respuesta es satisfactoria de la planta simulada en comparación con la respuesta obtenida experimentalmente con la planta física. Pero si nos fijamos en la curva de respuesta de la figura 3.83 la curva presenta unos escalonamientos al momento de estabilizarse, para disminuir dichos escalonamientos debemos ajustar los pesos entre la capa de entrada y la capa oculta de la red neuronal.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados de la simulación de las curvas del control difuso y neuronal en matlab.

Para verificar si la simulación de los dos controles de la planta es correcta, se programó en MATLAB utilizando las herramientas Fuzzy Logic Toolbox y Neural Network Toolbox.

A continuación se va a simular de 4 a 10 litros, ya que de 0 a 3 litros no va existir control debido a que se genera un sobre impulso en dicho rango. Por otro lado se va a sensar hasta 10 litros, ya que debemos tomar en cuenta la zona muerta del sensor que es 30 cm.

Tomando en cuenta que las condiciones iniciales del tanque es de 70 cm \approx 12 litros.

La mayor ventaja de estos dos controles es que provee una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no lineal sin usar matemática avanzada.

Para 4 litros (entrada) \rightarrow 3.163v

El objetivo de simular para cada set point es verificar que la señal a obtener debe aproximarse al valor estimado. Las curvas obtenidas para cada litro se muestran en las siguientes figuras:

Control Fuzzy

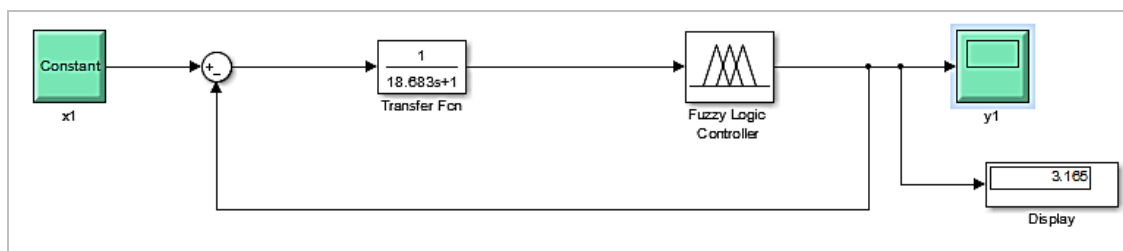


Figura 4. 1. Diagrama Fuzzy de la planta de nivel para 4litros.

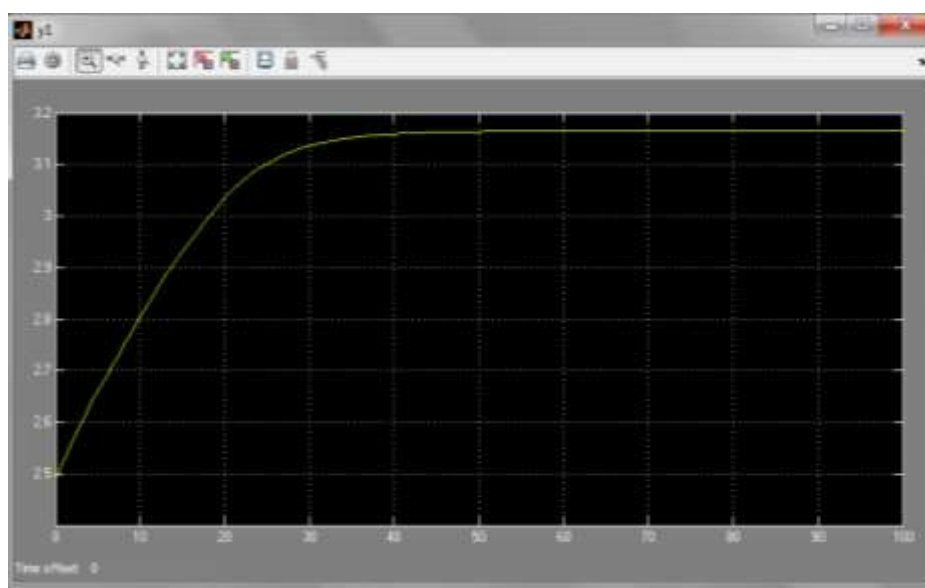


Figura 4. 2. Respuesta del Control Fuzzy para 4 litros.

Red Neuronal

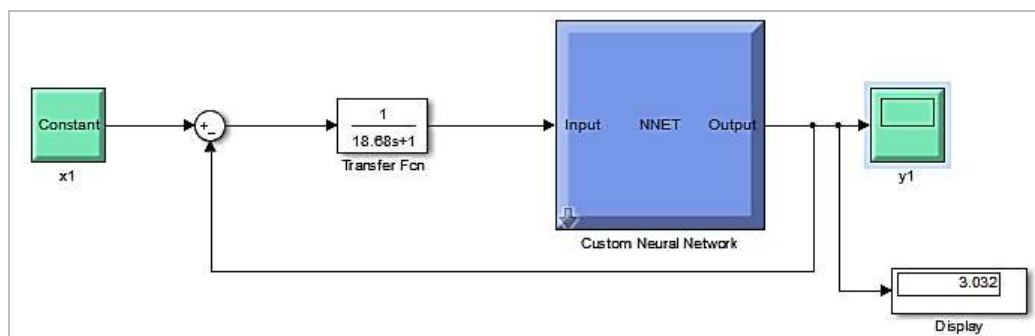


Figura 4. 3. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 4litros.

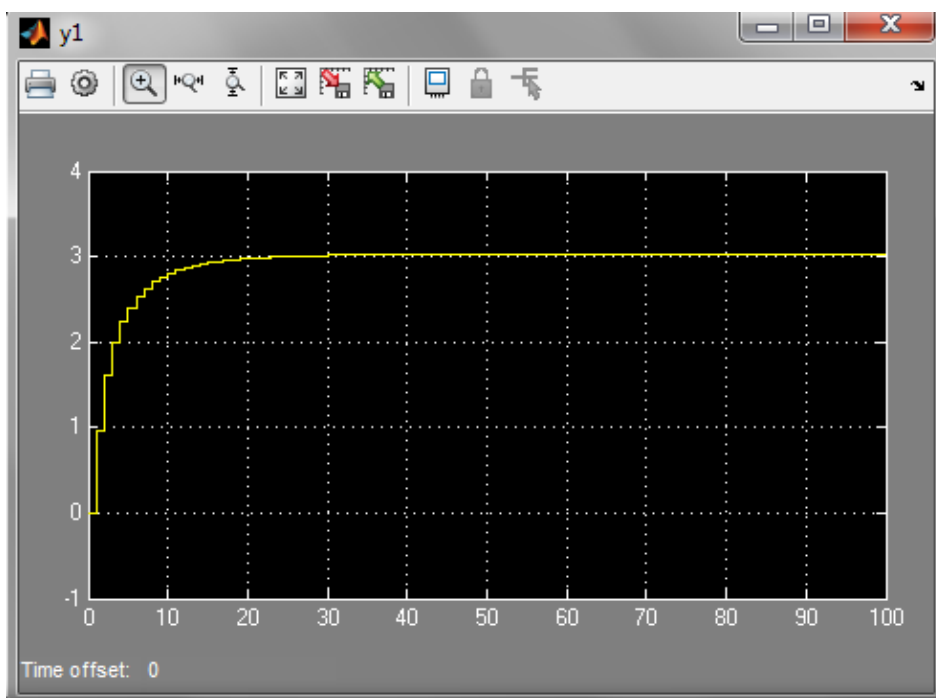


Figura 4. 4. Respuesta del Control Neuronal para 4 litros.

Tabla 4. 1

Comparación del tiempo de respuesta en 4 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,163 V	3,165	3,032
Tiempo de estabilización (seg)	45	22
Sobre impulso (%)	0	0
Error de estabilidad	0	0

Como podemos observar de forma general que ambos controles responden bien ante la respuesta que se requiere para 4 litros, en la tabla 1 nos indica el comportamiento de los controles, la respuesta del control neuronal (figura 4.4) es más rápida en estabilizarse ante la respuesta del control fuzzy (figura 4.2), ya que este se demora alrededor de 23 segundos que el control neuronal que lo hace a los 22 segundos.

En la figura 4.4 se observa en la curva que existen unos pequeños escalones al momento de estabilizarse, esto se debe al momento de

entrenar la red ir ajustando los pesos entre las capas de entrada y las capas ocultas de la red.

Para 5 litros (entrada) \rightarrow 3.369v

Control Fuzzy

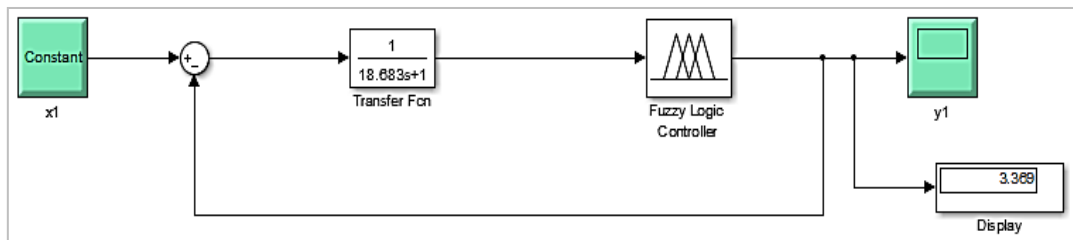


Figura 4. 5. Diagrama Fuzzy de la planta de nivel para 5 litros.

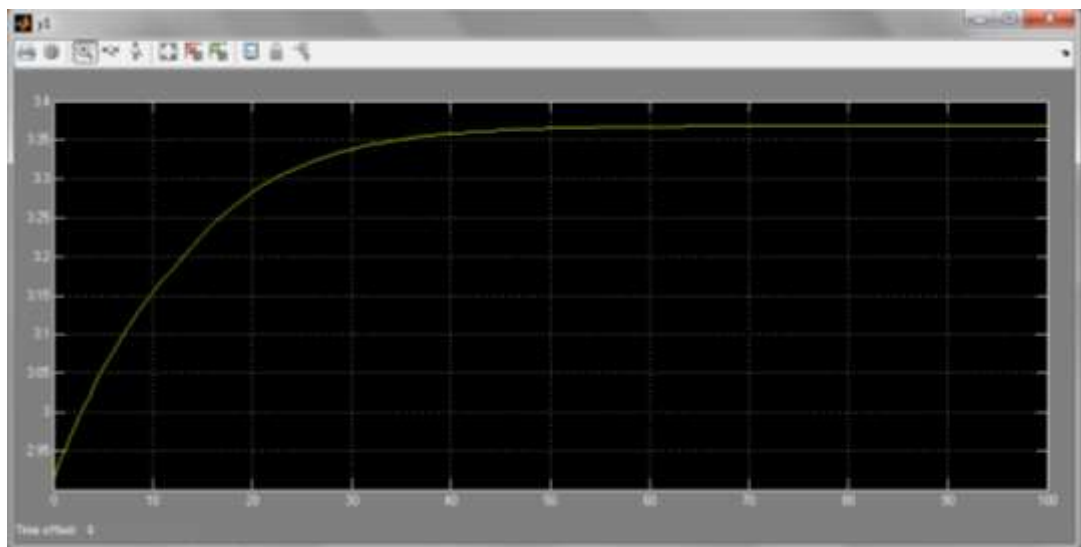


Figura 4. 6. Respuesta del Control Fuzzy para 5 litros.

Red Neuronal

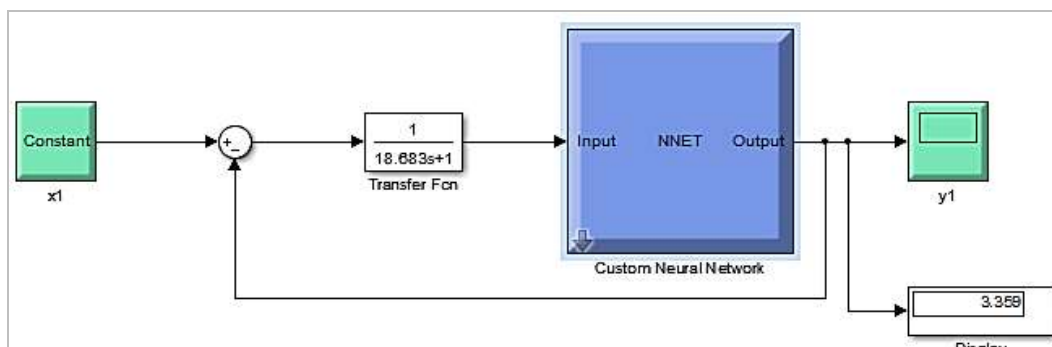


Figura 4. 7. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 5 litros.

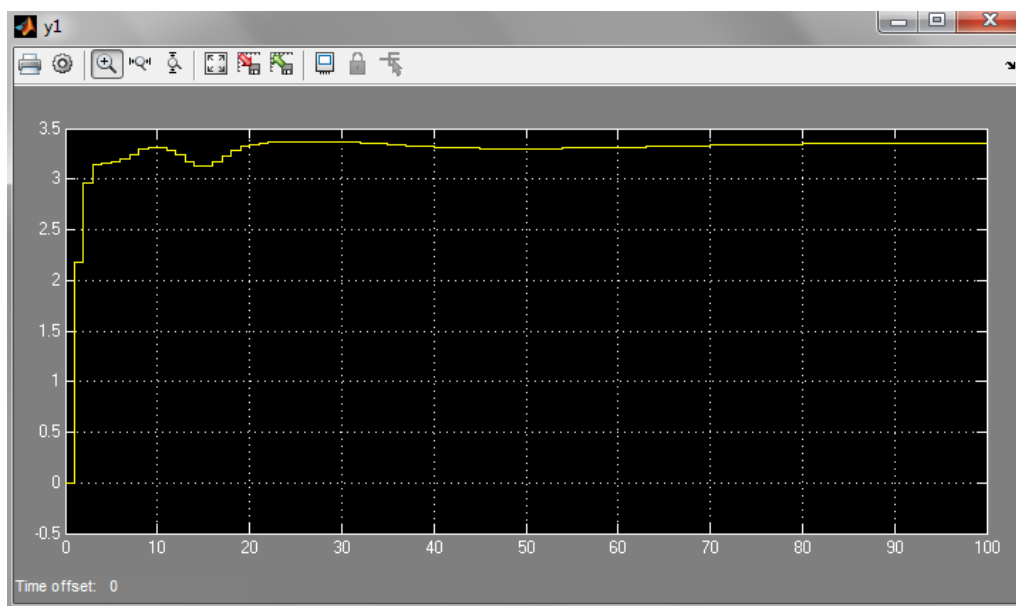


Figura 4. 8. Respuesta de la Red Neuronal para 5 litros.

Tabla 4. 2

Comparación del tiempo de respuesta en 5 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,369 V	3,369	3,359
Tiempo de estabilización (seg)	50	50
Sobre impulso (%)	0	0
Error de estabilidad	0	35

Para 5 litros observamos que ambos controles responden bien ante la respuesta que se requiere, en la tabla 2 nos indica el comportamiento de los controles para comparar el flujo de salida con el valor de referencia indicado.

Pero si nos fijamos en las curvas de respuestas en la figura 4.8 la curva presenta unos escalonamientos al momento de estabilizarse, para disminuir dichos escalonamientos debemos ajustar los pesos entre la capa de entrada y la capa oculta

Para 6 litros (entrada) → 3.31v

Control Fuzzy

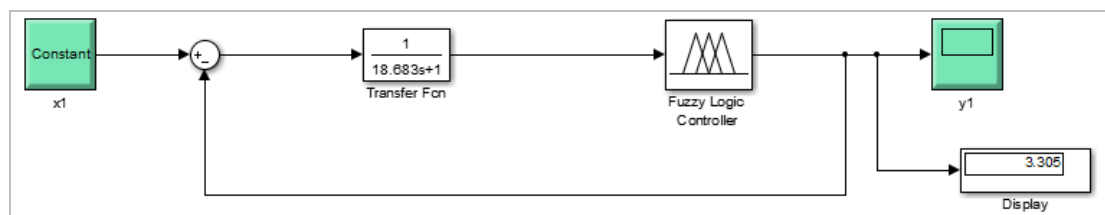


Figura 4. 9. Respuesta del Control Fuzzy para 6 litros.

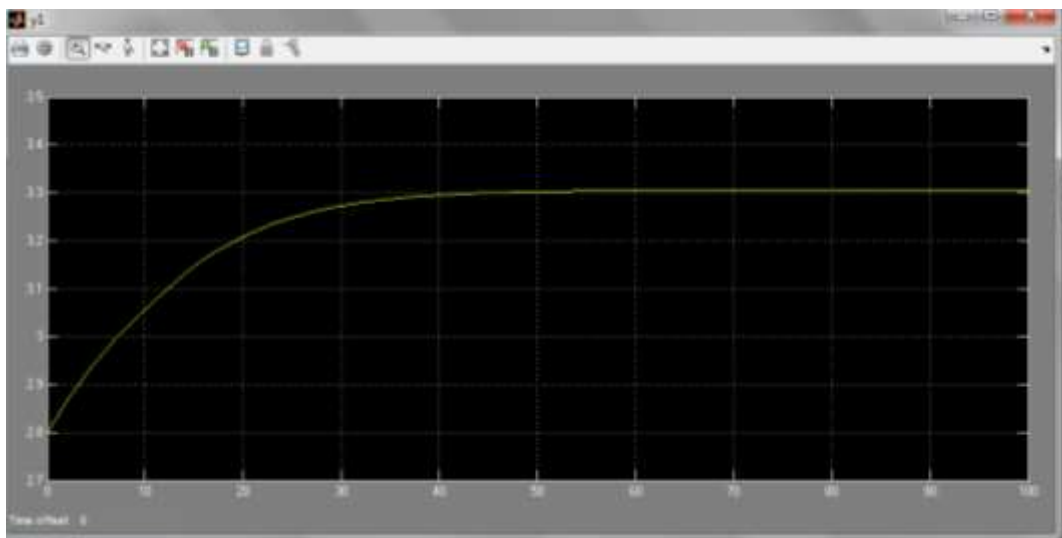


Figura 4. 10. Respuesta del Control Fuzzy para 6 litros.

Red Neuronal

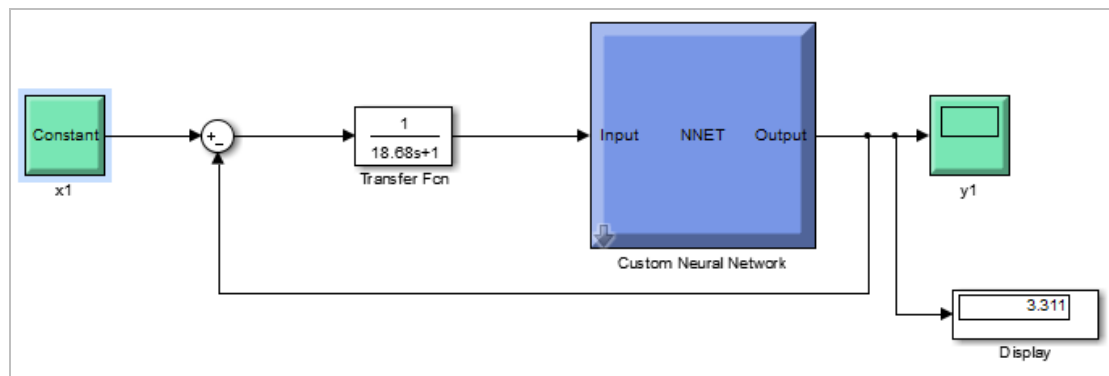


Figura 4. 11. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 6 litros.

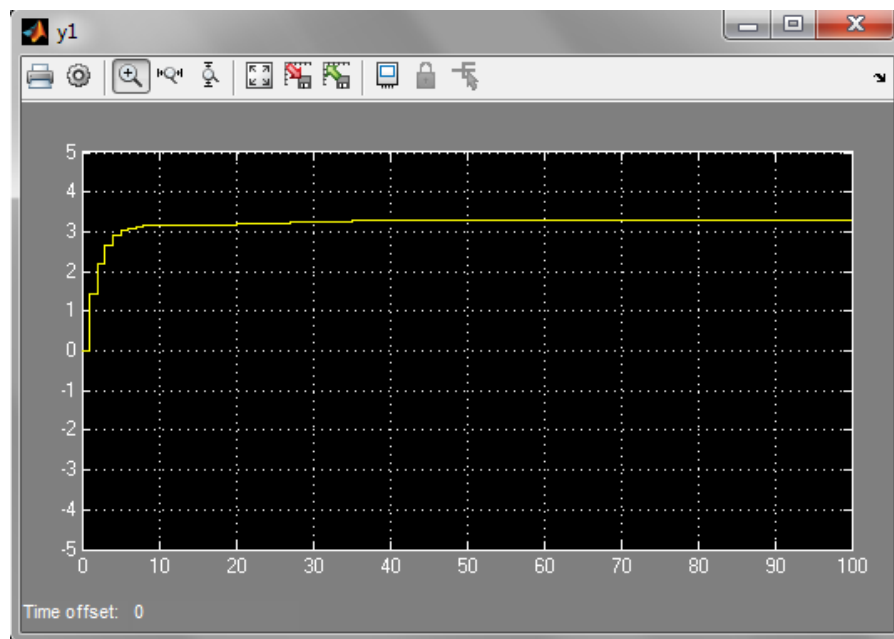


Figura 4. 12. Respuesta de la Red Neuronal para 6 litros.

Tabla 4. 3

Comparación del tiempo de respuesta en 6 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,31 V	3,305	3,311
Tiempo de estabilización (seg)	45	36
Sobre impulso (%)	0	0
Error de estabilidad	0	0

En el control difuso para 6 litros existe un rango de error de 0.005 ya que no coincide con la respuesta esperada debido a que debemos aumentar las reglas de membresía, mientras el control neuronal responde satisfactoriamente a la respuesta esperada.

Por otro lado el tiempo de estabilidad en el control neuronal es el más rápido que el control difuso como se puede observar en la tabla 3.

Para 7 litros (entrada) \rightarrow 3.568v

Control Fuzzy

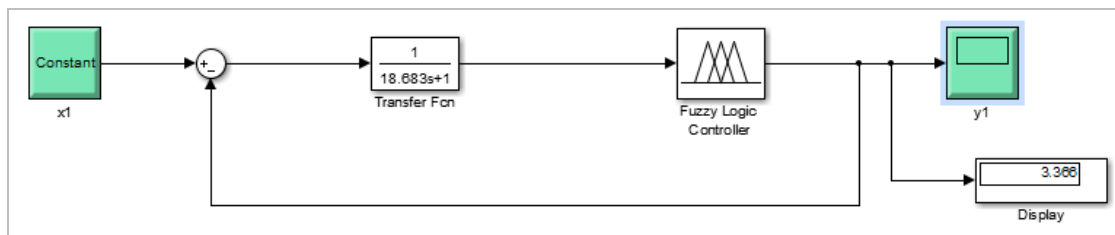


Figura 4. 13. Respuesta del Control Fuzzy para 7 litros.

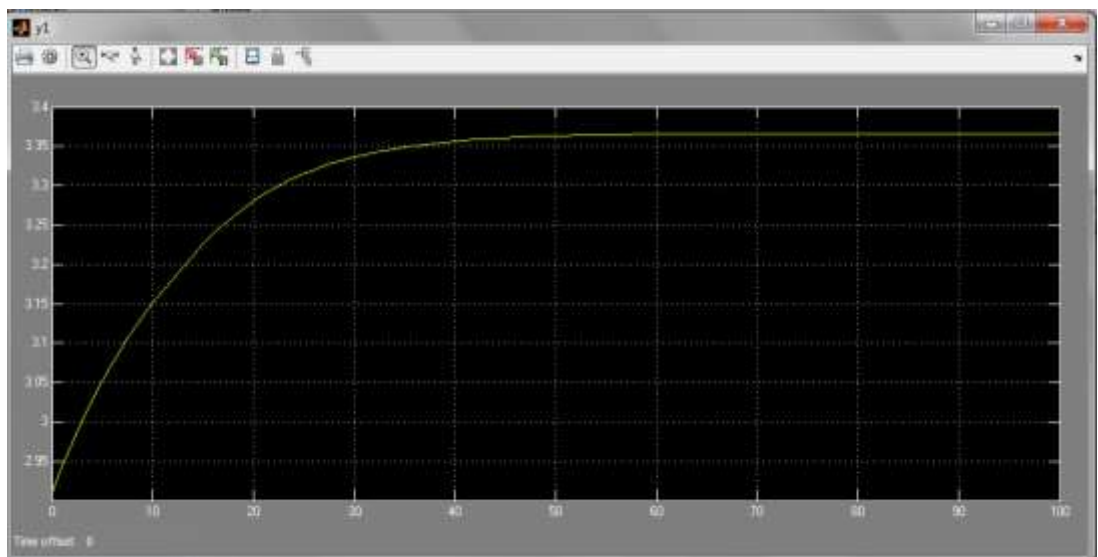


Figura 4. 14. Respuesta del Control Fuzzy para 7 litros.

Red Neuronal

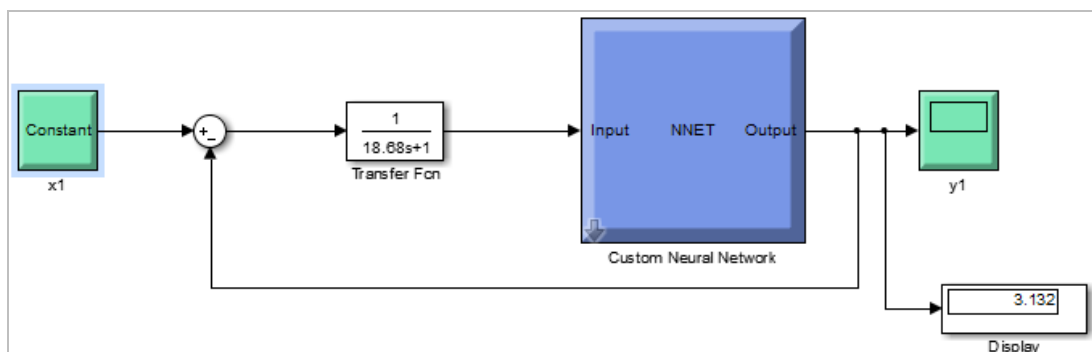


Figura 4. 15. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 7 litros.

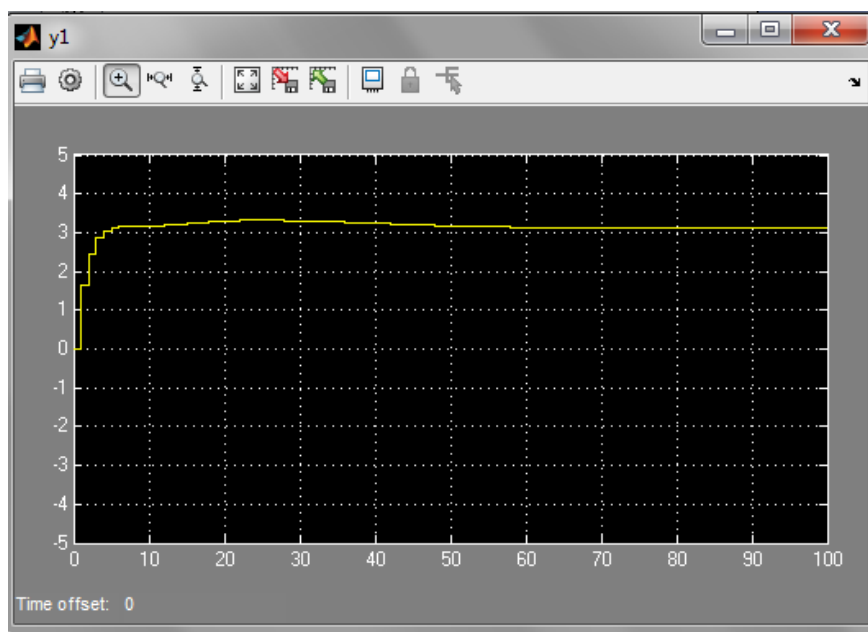


Figura 4. 16. Respuesta de la Red Neuronal para 7 litros.

Tabla 4. 4

Comparación del tiempo de respuesta en 7 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,568 V	3,366	3,132
Tiempo de estabilización (seg)	52	57
Sobre impulso (%)	0	30
Error de estabilidad	0	50

Para 7 litros los dos controles no responde satisfactoriamente a la respuesta esperada, ya que el control neuronal tiene un error de respuesta de 0.436, mientras el control difuso tiene un 0.202, este último valor podríamos tomarlo como el valor más a la respuesta esperada.

En la tabla 4.4 se observa el tiempo de estabilización el control difuso es más rápido que el control neuronal que tarda 5 segundos.

La figura 4.16 nos indica el error de estabilidad en el control neuronal que tiene de un 50% esto depende por número de épocas con las que iniciamos en el código de programación.

Para 8 litros (entrada) → 3.643v

Control Fuzzy

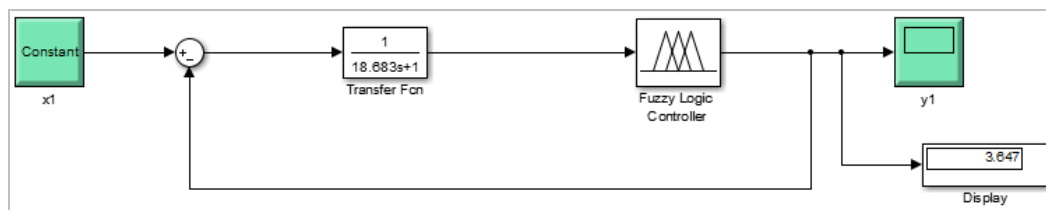


Figura 4. 17. Respuesta del Control Fuzzy para 8 litros.

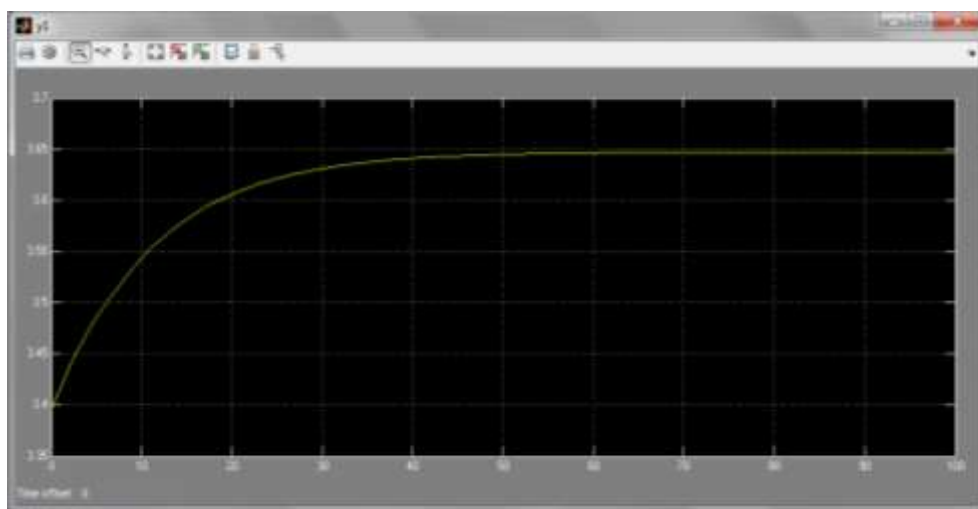


Figura 4. 18. Respuesta del Control Fuzzy para 8 litros.

Red Neuronal

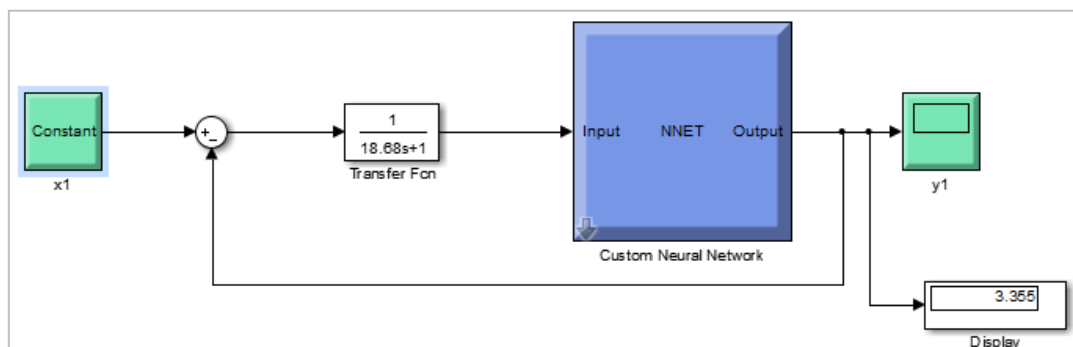


Figura 4. 19. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 8 litros.

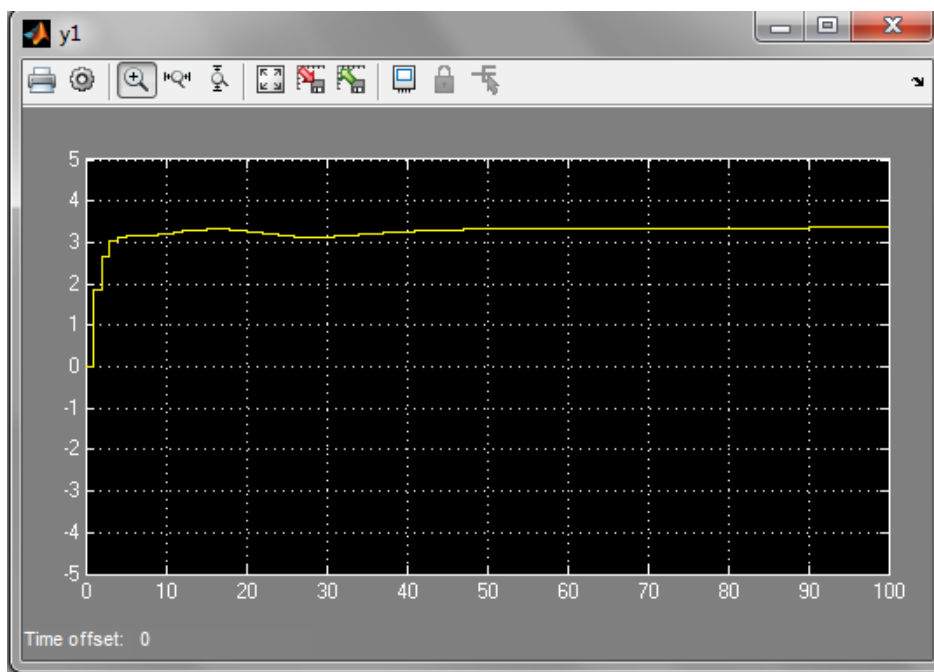


Figura 4. 20. Respuesta de la Red Neuronal para 8 litros.

Tabla 4. 5

Comparación del tiempo de respuesta en 8 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,643 V	3,647	3,355
Tiempo de estabilización (seg)	50	46
Sobre impulso (%)	0	25
Error de estabilidad	0	40

Para 8 litros el control difuso responde satisfactoriamente a la respuesta esperada que el control neuronal, en la tabla 4.5 se observa el tiempo de estabilización el control neuronal es más rápido que el control difuso que tarda 4 segundos.

La figura 4.20 nos indica la curva de respuesta del control neuronal la misma que varían por no ser continua esto depende por número de épocas con las que iniciamos en el código de programación

Para 9 litros (entrada) → 3.7399v

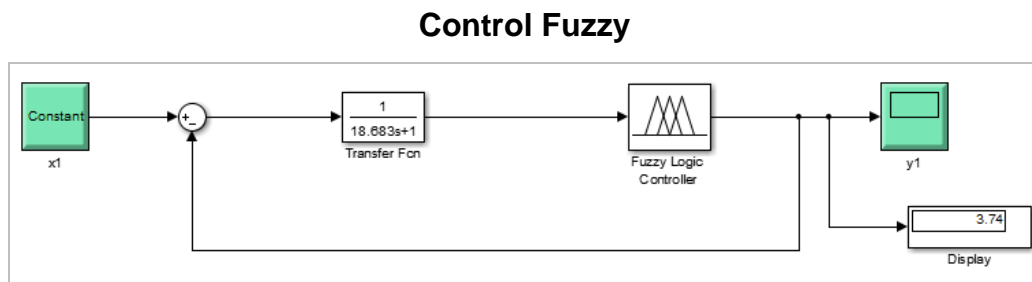


Figura 4. 21. Respuesta del Control Fuzzy para 9 litros.

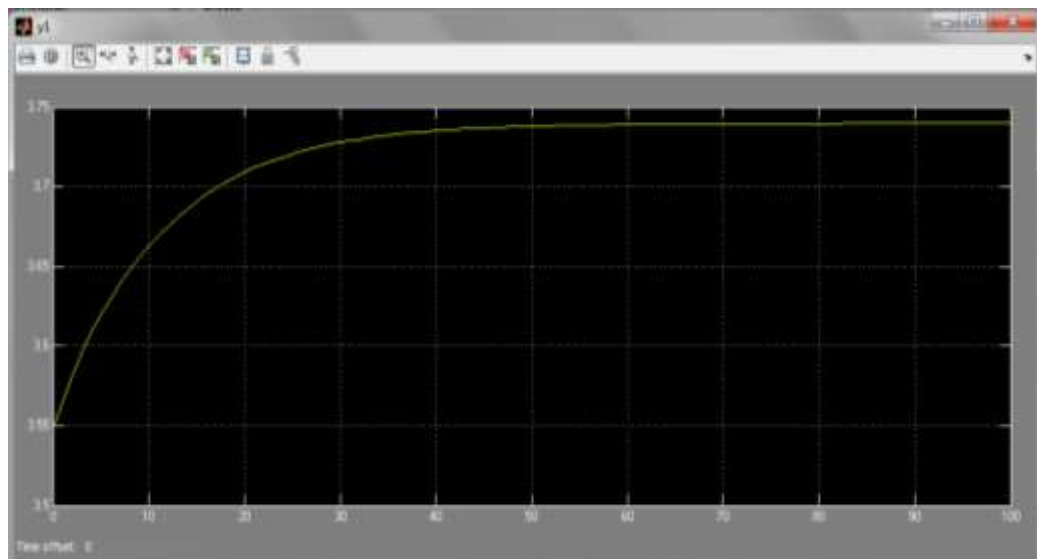


Figura 4. 22. Respuesta del Control Fuzzy para 9 litros.

Red Neuronal

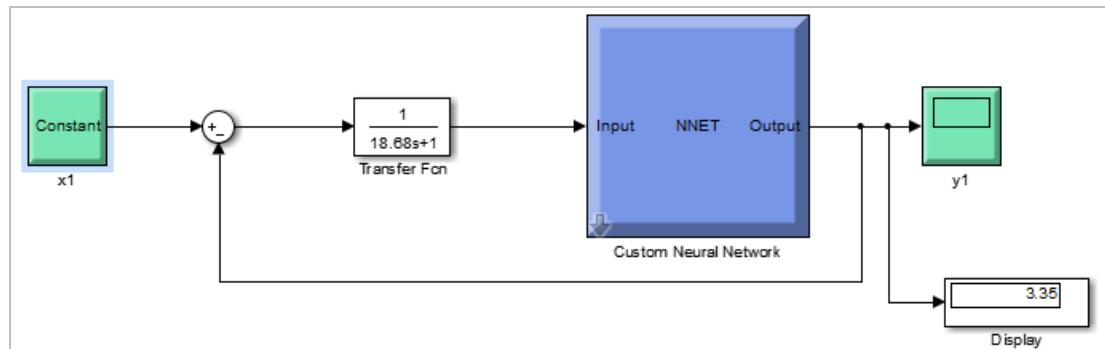


Figura 4. 23. Diagrama Neuronal de la planta de nivel set point 9 litros.

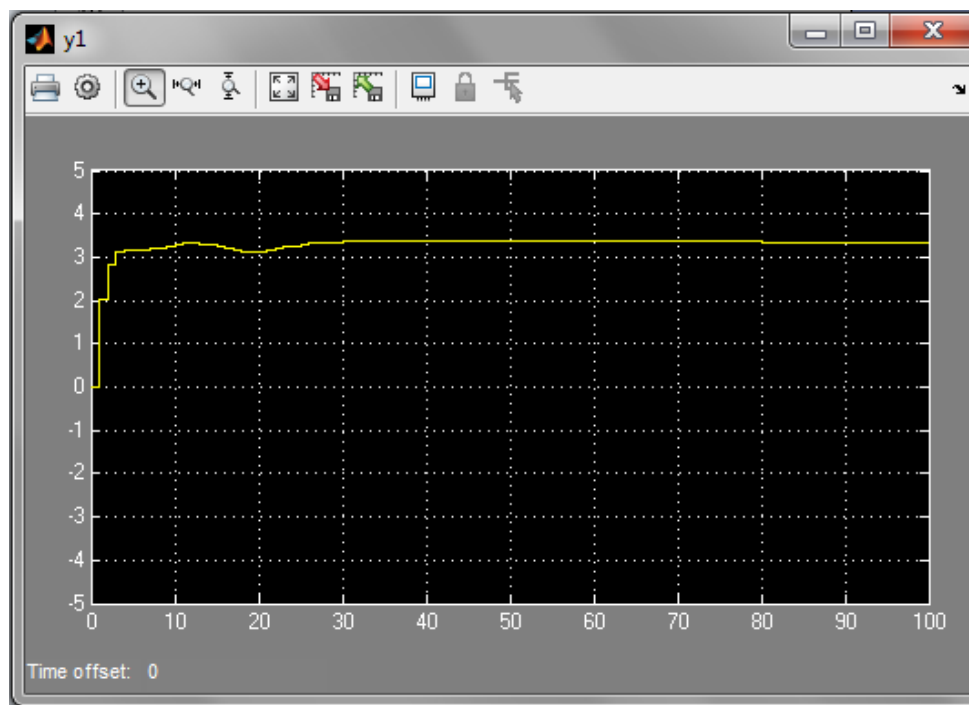


Figura 4. 24. Respuesta de la Red Neuronal para 9 litros.

Tabla 4. 6

Comparación del tiempo de respuesta en 9 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,739 V	3,74	3,35
Tiempo de estabilización (seg)	53	30
Sobre impulso (%)	0	0
Error de estabilidad	0	25

En el control neuronal para 9 litros existe un rango de error de 0.39 ya que no coincide con la respuesta esperada debido a que la bomba se satura para que trabaje a la mitad de su velocidad, mientras el control difuso responde satisfactoriamente es por esto que los parámetros elegidos aleatoriamente converjan muy lentamente.

Por otro lado el error de estabilidad en el control neuronal es el 25%, el mismo que se debe al tipo de entrenamiento que se dio al momento de generar el código Ej. (tansig)

Para 10 litros (entrada) → 3.915v

Control Fuzzy

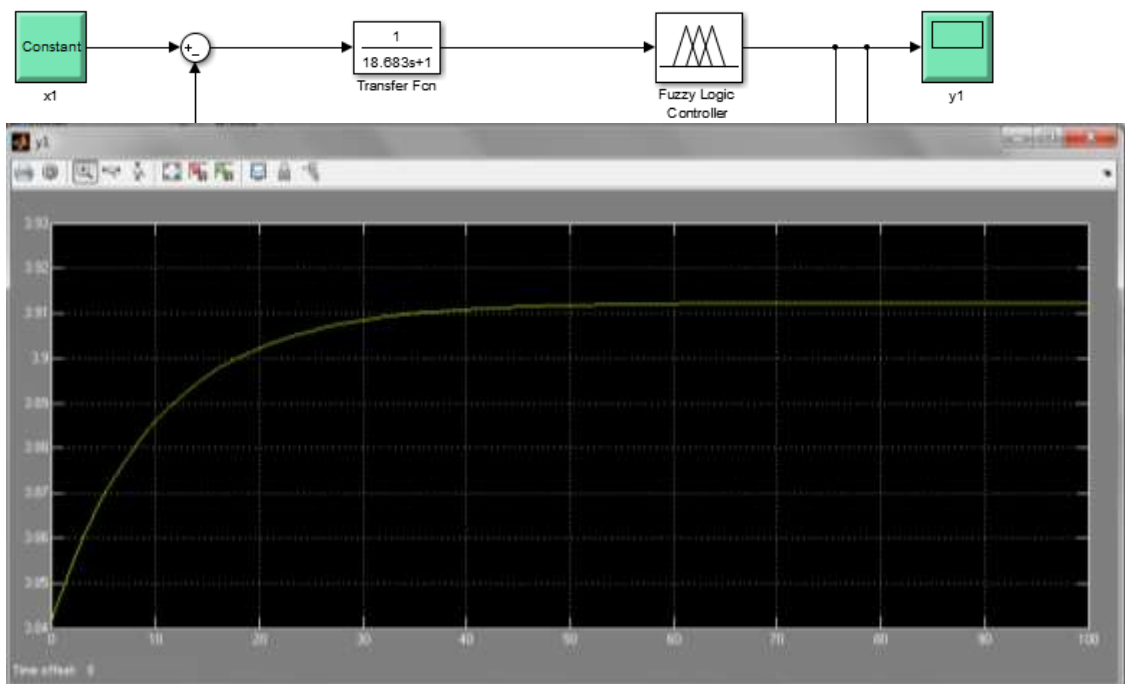


Figura 4. 25. Respuesta del Control Fuzzy para 10 litros.

Red Neuronal

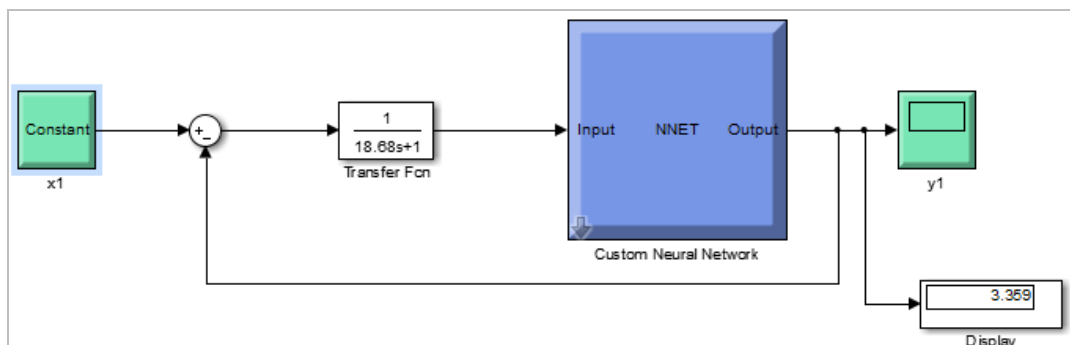


Figura 4. 26. Diagrama Neuronal de la planta de nivel para 10 litros.

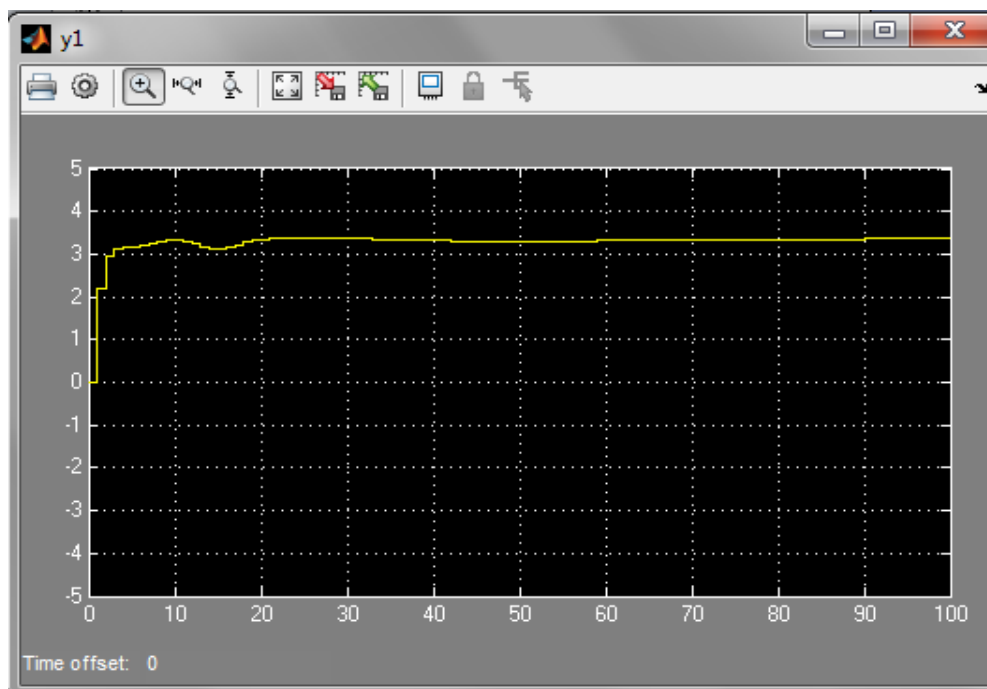


Figura 4. 27. Respuesta de la Red Neuronal para 10 litros.

Tabla 4. 7

Comparación del tiempo de respuesta en 10 litros.

Especificación en el dominio del tiempo	Control Lógico Difuso	Control Red Neuronal
Respuestas esperadas 3,915 V	3,912	3,359
Tiempo de estabilización (seg) Sobre impulso (%)	52 0	22 0
Error de estabilidad	0	20

En la tabla 4.7 observamos que el control neuronal es más rápido en estabilizarse que el control difuso ya que este tarda 30 segundos. Pero en 10 litros el control neuronal no responde bien ante la respuesta esperada, mientras que el control difuso su respuesta es satisfactoria

Por otro lado existe el 20% de error de estabilidad en el control neuronal, ya que el mismo se debe al número de capas que nosotros le damos a la neurona, entre mayor sea el número menor será el error de estabilidad, para nuestro caso utilizamos: número de capas=10

4.2. Análisis de resultados de la simulación de las curvas del control difuso y neuronal en labview

ANÁLISIS DE RESULTADOS

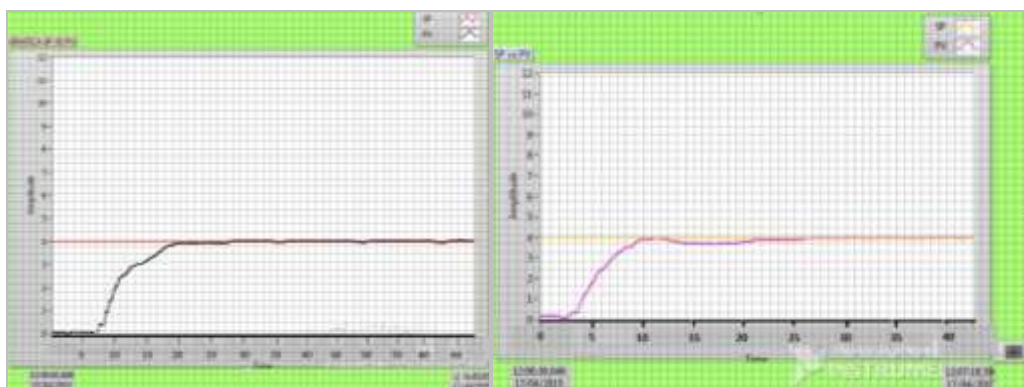
- **Diseño de las pruebas**

El objetivo de las pruebas consiste básicamente en encontrar un punto de operación óptimo de la planta (**PV**) al momento en que el operador disponga de un valor de seteo (SP), cimentándose en el comportamiento de la variable de control (CV), que no es más que el valor de voltaje que el controlador envía al variador de frecuencia y el mismo a la bomba de suministro del sistema.

Con esta metodología, se ejecutó un análisis de las gráficas resultantes del comportamiento de la planta para cada set point, tanto para el control Difuso como para el **Neuronal**. A continuación se muestra la tabla de datos obtenidos de las gráficas de comportamiento de la planta con cada uno de los controladores implementados en el proceso.

GRÁFICAS CONTROL DIFUSO VS CONTROL POR REDES NEURONALES (Anexos T y U).

NOTA.- Los valores tomados en las gráficas de comportamiento de la planta dictaminan un error del $(\pm 0,5)\%$, rango permisible de un óptimo funcionamiento.



CONTROL FUZZY CONTROL NEURONAL
Figura 4. 28. Respuesta de la Red Neuronal para 4 litros.

Tabla 4. 8
Comparación fuzzy y neuronal para 4 litros en LabVIEW.

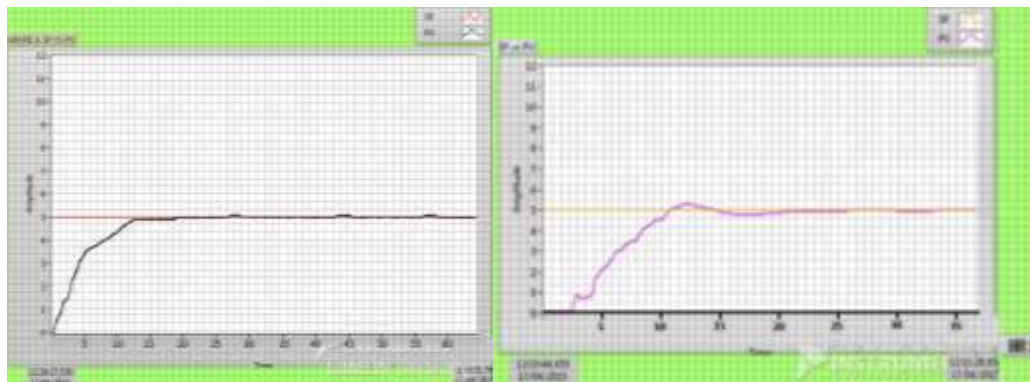
CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP)	T. de sobreimp. (seg)	T. de bajo-imp. (seg)	T de estab. (seg)	Set Point (SP)	T de sobreimp (seg)	T de bajo-imp (seg)	Tiempo de estab. (seg)
4	13 < t < 25	0	t > 25	4	0	0	t > 20

ANÁLISIS:

- En la tabla 4.8 se observa que el Control Difuso emplea menos tiempo que el Control por Redes Neuronales en hacer que la variable de proceso (PV) o planta intente llegar al Set-Point (SP) para tratar de

estabilizarse, esto es gracias al diseño de las funciones de membresía o pertenencia y sus reglas de inferencia, inmersas en el control Difuso, específicamente corresponde a los datos pre-definidos en la variable de salida cuando se diseñó aquella función figura 4.29.

- El control por Redes Neuronales se estabiliza más rápido que el control Difuso, esto sucede gracias a que el primer control no posee un módulo integrador dentro de su diseño que compense el error en estado estacionario por lo cual, tiene mayor cantidad de recursos el procesador para realizar el control neuronal.
- La ventaja de usar un módulo integrador dentro del control difuso es que el valor del error entre PV-SP tiende a cero cuando el tiempo tiende al infinito, mientras que el error que se presenta entre PV-SP en el control Neuronal es fluctuante o no tiende hacerse cero mientras el tiempo tiende al infinito, ya que la red fue entrenada con el modelo de un control PID sacada de la misma planta.



CONTROL FUZZY

CONTROL NEURONAL

Figura 4. 29. Respuesta de la Red Neuronal para 5 litros.

Tabla 4. 9

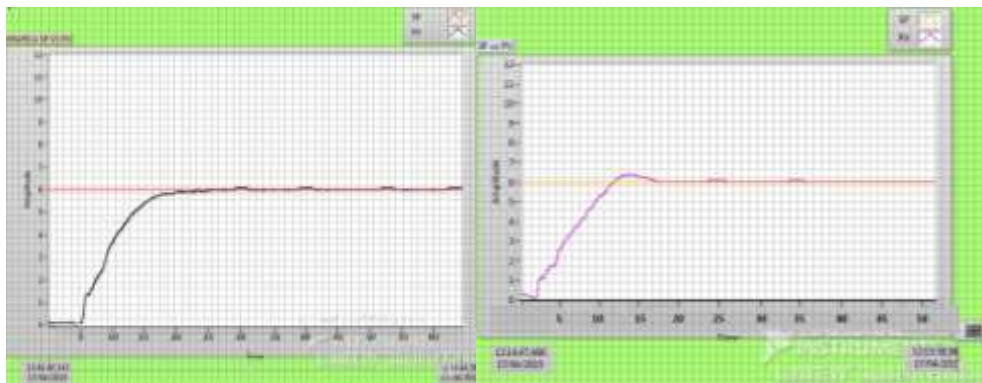
Comparación fuzzy y neuronal para 5 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
5	$10 < t < 15$	$15 < t < 21$	$t > 21$	5	0	0	$t > 20$

ANÁLISIS:

- Para este Set-Point, de igual manera el Control Difuso emplea menos tiempo que el Control por Redes Neuronales en hacer que la variable de proceso (PV) o planta intente llegar al Set-Point (SP) para tratar de estabilizarse, es decir que presenta mejor respuesta al arranque de la bomba, esto de la misma forma, es gracias al diseño de las funciones de membresía o pertenencia y sus reglas de inferencia, inmersas en el controlador, específicamente corresponde a los datos definidos en la variable de salida cuando se diseñó el conjunto difuso.
- Si bien observamos en la figura 4.29, que en el Control difuso la variable de proceso alcanza el Set-Point más rápido que en el Control Neuronal, éste presenta un pequeño sobre-impulso y amortiguamiento de onda, es decir que en cierto intervalo de tiempo la señal de la (PV) se presenta como una señal sinusoidal antes de que ésta se estabilice en el tiempo.
- Como se observa en la tabla 4.9 amortiguamiento de la señal de Proceso se presenta porque el controlador Difuso está eliminando el (error \pm) que arroja la señal de la planta con respecto a la del Set-Point en la salida del mismo, todo esto, gracias al módulo integrador implementado en el diseño previo, el cual tomó importancia al compensar el error de sintonización entre los requerimientos de la planta real y el Controlador.

- Por otro lado, es importante destacar que el control por Redes Neuronales se estabiliza más rápido que el control Difuso, aunque en este Set-Point, la diferencia de tiempo de estabilización entre los dos controladores no es significativa.
- Dentro del controlador que utilizó Redes Neuronales, se observó que la señal de la planta o proceso (PV) presenta ciertas variaciones en el tiempo cuando este tiende al infinito, este comportamiento es debido a que la bomba está tratando de mantener un valor constante de líquido en el tanque.



CONTROL FUZZY

CONTROL NEURONAL

Figura 4. 30. Respuesta de la Red Neuronal para 6 litros.

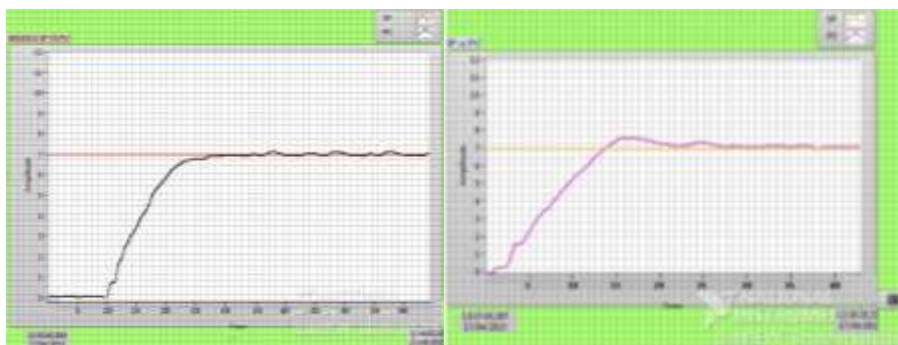
Tabla 4. 10

Comparación fuzzy y neuronal para 6 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (Fuzzy logic)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
6	$11 < t < 18$	0	$t > 18$	6	0	0	$t > 25$

ANÁLISIS:

- Para este punto de referencia, se obtuvo un análisis similar al de los anteriores Set Points (SP), al decir que el control Difuso empleó menos tiempo que el control Neuronal para que la variable de proceso (PV), alcance el valor requerido. A esto, justificamos de la misma forma que para los puntos (4,5), es decir que la bomba actúa más rápida en el control Difuso que el Neuronal gracias a su diseño previo de conjuntos difusos.
- De igual forma que para un Set-Point de (5 litros), éste presenta un pequeño sobre-impulso ver la figura 4.30 por parte de la variable de proceso (PV) con referencia a la señal de seteo, así mismo, esto ocurrió debido a que el controlador está eliminando el error presente en la salida entre la (PV y SP), generado por el integrador implementado en el diseño de bloques del control Difuso.
- En la tabla 4.10 se observa el tiempo de estabilización de la (PV) del controlador Difuso es más rápido que el de Redes Neuronales, esto se debe al diseño de los conjuntos difusos (rango) específicamente hablando tanto de entrada como de salida haciendo que la respuesta de la Planta sea más conveniente y satisfactoria a los requerimientos del proceso.
- Cuando la señal de la planta tiende al infinito los dos controladores presentan un desempeño muy similar.



CONTROL FUZZY

CONTROL NEURONAL

Figura 4. 31. Respuesta de la Red Neuronal para 7 litros.

Tabla 4. 11

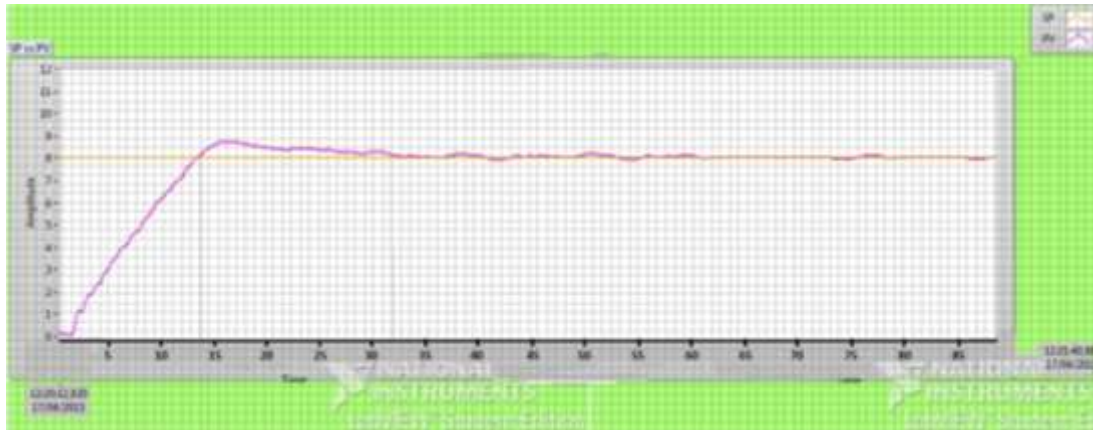
Comparación fuzzy y neuronal para 7 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
7	$13 < t < 28$	0	$t > 37$	7	0	0	$t > 35$

ANÁLISIS:

- Para un valor de 7 litros sabemos que la (PV) del control Difuso llega más rápido hacia el punto de referencia que el control Neuronal figura 4.31, pero como éste no posee una rampa de desaceleración como el otro control, este se pasa de la referencia en un inicio (sobre-impulso), para después descender a medida que el error de salida entre (SP y PV) tienda a cero a medida que el tiempo también lo haga.
- El control por redes Neuronales llega aparentemente de manera más veloz a estabilizarse, aunque existen variaciones de los valores de la variable de la Planta con respecto a la de referencia, dando la impresión que esta sufre un amortiguamiento constante con el tiempo. Por otro lado este fenómeno puede atribuirse a que faltaron datos de entrenamiento para la red y así provocar un mejor comportamiento del proceso.
- En la tabla 4.11, se observa el tiempo de estabilización de la (PV) del controlador Difuso es más rápido que el de Redes Neuronales, esto se debe al diseño de los conjuntos difusos (rango) específicamente hablando tanto de entrada como de salida, haciendo que la respuesta de la Planta sea más conveniente y satisfactoria a los requerimientos del proceso.
- Con respecto a la estabilización de la señal, de la variable de proceso en el control difuso, este se toma más tiempo que el Neuronal, pero cuando

la misma tiende al infinito no presenta aquellas variaciones con respecto al Set Point.



CONTROL FUZZY



CONTROL NEURONAL

Figura 4. 32. Respuesta de la Red Neuronal para 8 litros.

Tabla 4. 12

Comparación fuzzy y neuronal para 8 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
8	$13 < t < 33$	0	$t > 60$	8	0	0	$t > 75$

ANÁLISIS:

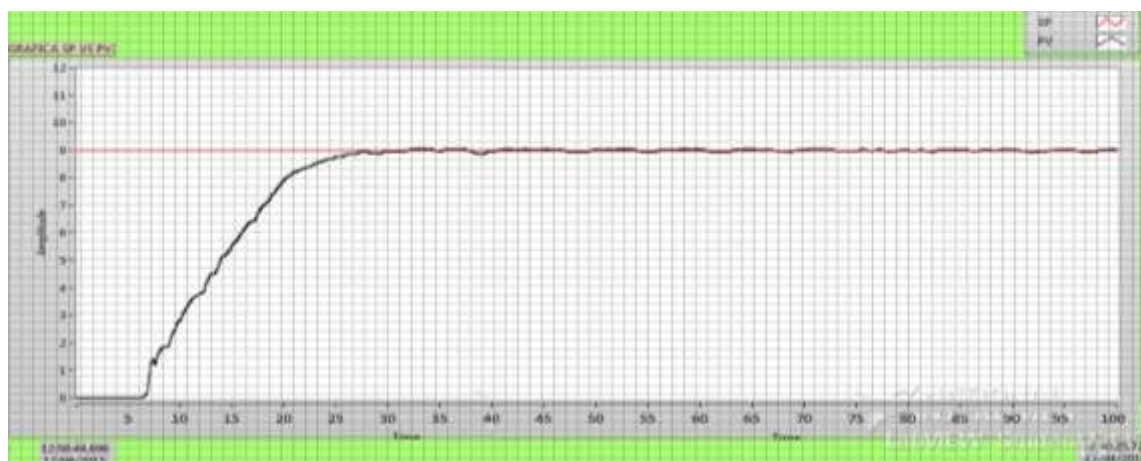
- En la figura 4.32 se observa para 8 litros existe una diferencia significativa al momento en que entra la comparativa del arranque de la bomba y el tiempo de respuesta de la (PV) por parte de los dos controladores, por un lado el Difuso tiene una respuesta súbita al iniciar el arranque de la bomba, tanto que el Neuronal tarda en reaccionar; aquí existen varios motivos que justifican el comportamiento de la variable para cada uno de los controladores. Por un lado el tiempo de reacción inmediato del Control Difuso se debe al diseño del mismo, donde se relaciona la construcción de sus conjuntos y sus variables, donde ésta puede volverse más rápida o más lenta, según se hayan planteado los rangos de funcionamiento de las mismas para dichos conjuntos. En cambio, por el lado del control Neuronal y su respuesta tardía de la (PV) al instante en que la bomba da arranque, se produce a la falta de inferencia de puntos de entrenamiento que sirvan para hacer actuar al controlador de manera más veloz.
- Existe un sobre impulso por parte de la (PV) en el controlador Difuso y esto se debe a que el mismo se tarda en eliminar el error entre el (SP y PV), por lo tanto emplea más tiempo para que la PV tienda a ser igual que el valor pre-establecido o sea el Set-Point dispuesto por el operador de la planta.
- En las gráficas de comportamiento se observa que la Red Neuronal se tarda más tiempo en estabilizarse, ya que primero sufre un amortiguamiento de la señal antes de intentar hacerse constante en el tiempo, esto ocurre porque la red está emulando lo aprendido y parte de ello, fue que tomó datos de un PID como modelo, entonces no es raro pensar que la red Neuronal también presente un amortiguamiento en la (PV) antes de estabilizarse como aquellos métodos tradicionales antes mencionados.- Esto no quiere decir que es una regla fija o que la red Neuronal se comporte siempre en base al modelo que fue parte de su entrenamiento, ya que la red Neuronal es un método inteligente y puede

inferir datos desde lo más simple hasta lo más complejo, pero se debe tomar en cuenta que la red requerirá más datos de aprendizaje y más tiempo de entrenamiento.

- En la tabla 4.12 se observa que el tiempo de estabilización de la (PV) del controlador Difuso es más rápido que el de Redes Neuronales, así mismo, se debe al diseño de los conjuntos difusos, a los valores del rango donde se diseñan los conjuntos, tanto de entrada como de salida haciendo que la respuesta de la Planta sea más conveniente y satisfactoria a los requerimientos del proceso.



CONTROL FUZZY



CONTROL NEURONAL

Figura 4. 33. Respuesta de la Red Neuronal para 9 litros.

Tabla 4. 13

Comparación fuzzy y neuronal para 9 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
9	$18 < t < 60$	0	$t > 60$	9	0	0	$t > 40$

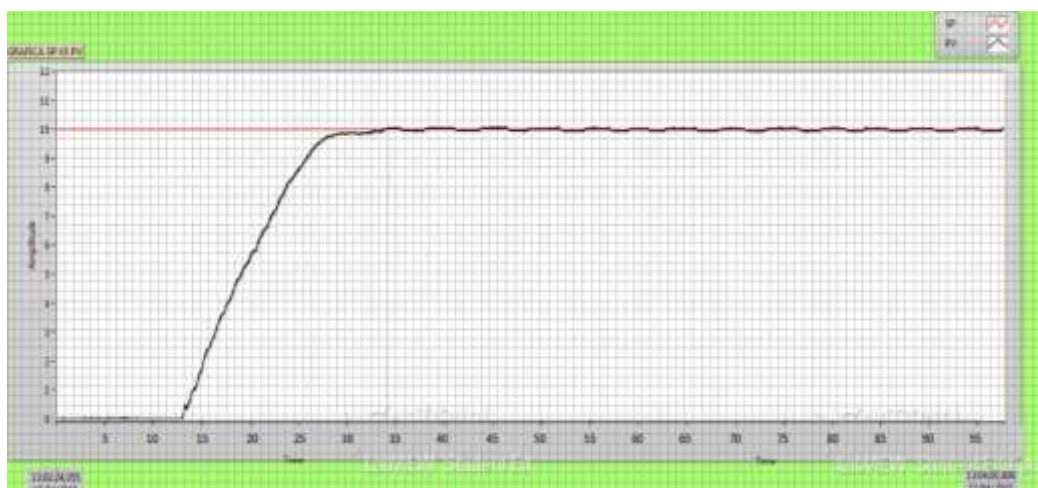
ANÁLISIS:

- Para los 9 litros se puede visualizar en la figura 4.33 que el control con la Red Neuronal presenta un mejor desempeño de la PV, además que no posee ningún sobre impulso y finalmente se estabiliza más rápido que el otro controlador. El único defecto puede ser el tiempo de reacción de la variable de proceso (PV) cuando la bomba arranca, pero el mismo puede mejorar entrenándose con más puntos de referencia, tomados al arrancar la bomba, provocando una reacción más óptima de la variable de proceso, esto obviamente implica más tiempo de entrenamiento y la realización de pruebas de funcionamiento de la red.
- Por otro lado, y al igual que en el resto de seteos, el control Difuso presenta un mejor desempeño de la variable de proceso (PV) al arrancar la bomba, esto ya se explicó anteriormente porqué sucede; ahora nos centramos en ver que este método de control inteligente presenta un sobre-impulso que tarda mucho tiempo en estabilizarse ver tabla 4.13. La razón de aquello es que el integrador implementado dentro del diseño de bloques del Difuso, conlleva con si un acumulador de error directamente proporcional al tiempo en el que el proceso se encuentre en línea, es decir que a más tiempo de funcionamiento más se acumula el error y por lo tanto más se demora el controlador en eliminar el mismo entre la PV y el Set Point (SP). De la misma forma existe maneras en las

que se puede mejorar el desempeño del controlador, sea esto cambiando el diseño de los conjuntos de salida o manipulando rangos de acción de las variables, etc., sin embargo queda a criterio y experiencia del programador. Cabe ponderar, que el encontrar un óptimo desempeño de un controlador hacia un proceso cualquiera que este sea, requiere análisis constantes correspondientes a lo que comúnmente llamamos (prueba y error).



CONTROL FUZZY



CONTROL NEURONAL

Figura 4. 34. Respuesta de la Red Neuronal para 10 litros.

Tabla 4. 14
Comparación fuzzy y neuronal para 10 litros en LabVIEW.

CONTROLADOR LÓGICA DIFUSA (<i>Fuzzy logic</i>)				CONTROLADOR REDES NEURONALES (NN)			
Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)	Set Point (SP) Litros	Tiempo de sobreimpulso (seg)	Tiempo de bajo impulso (seg)	Tiempo de estabilización (seg)
10	$20 < t < 60$	0	$t > 65$	10	0	0	$t > 35$

ANÁLISIS:

- Para el análisis en este punto, utilizamos una síntesis idéntica a la del Set Point anterior, y nos percatamos que la red Neuronal presenta un mejor desempeño o valoración de la planta por su corto tiempo de estabilización y por no presentar sobre impulsos figura 4.34, la variación entre el valor de seteo y de la planta es muy mínima cuando el tiempo tiende al infinito haciendo de este control inteligente, un método confiable para regular este proceso. El único inconveniente fue la reacción lenta por parte de la bomba al dar arranque.
- De igual manera el Control difuso presentó un problema generalizado de sobre impulso y en este Set Point no fue la excepción. Una de las causas que también infirieron en este tipo de control inteligente además del diseño de los conjuntos, fue la capacidad de la bomba (watts), su potencia muy alta para controlar un volumen muy pequeño. Es así que brindó ventajas y desventajas, por un lado ayudó al controlador a reaccionar súbitamente en el arranque, como también presentó una respuesta tardía cuando la variable de planta se acercaba al Set-Point provocando sobre dichos impulsos.

4.3. Análisis de resultados simulación vs parte experimental

Las respuestas de los controladores inteligentes (**fuzzy y Neuronal**) para el proceso de la planta de nivel simulada mediante la plataforma de MATLAB, son satisfactorias dado que las respuestas de la misma son cercanas en comparación con las respuestas obtenidas experimentalmente con la planta física, otro punto favorable de la planta simulada, es que tanto para el control fuzzy y neuronal se puede modificar la arquitectura de la programación para conseguir la respuesta deseada, ya que nos ayudaría de una manera lógica para implementar en la parte experimental. Este último punto es bueno ya que en la realidad a veces no se logra mantener estable la señal del sensor, debido al excesivo ruido que hay en el exterior y por ende no obtendríamos un control satisfactorio. Mientras en la parte experimental se obtuvo un óptimo desempeño de los dos controladores a través de la plataforma de LABVIEW.

En las figuras 4.6 (MATLAB) y 4.30 (LABVIEW) para un set point de 5 litros se justifica que ambos controles presentan un desempeño satisfactorio, es decir que sus respuestas son cercanas con las de la tabla 3.9. Por otro lado en sus tiempos de estabilización ambos controles se estabilizan en un tiempo $t > 21$ segundos. Mientras que las curvas de respuestas de las figuras antes mencionadas se observa que hay un pequeño sobre-impulso al iniciar su trayectoria, esto implica el tiempo de reacción de la variable de proceso (PV) cuando la bomba arranca, pero el mismo puede mejorar entrenándose con más puntos de referencia, tomados al arrancar la bomba, provocando una reacción más óptima de la variable de proceso, esto obviamente implica más tiempo de entrenamiento y la realización de pruebas de funcionamiento de la red.

4.4 Análisis de Costos

El análisis de costos, tiene por objetivo determinar el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto. A continuación se presenta en la tabla I, la lista de los materiales utilizados en la elaboración del proyecto con sus respectivos precios en el mercado local.

Tabla 4. 15
Listado de Materiales

N°	Componente	Valor/Unidad	Valor Total
1	Sensor HRXL- MAXSONAR-WRM (MB7369)	280,00	280,00
1	Tarjeta de Adquisición de Datos myDAQ	332,64	332,64
1	Bomba Centrifuga 3Ø ½[Hp]- Thebe y Variador de Frecuencia	520,00	520,00
2	Tanques	35,00	70,00
1	Estructura	180,12	180,12
1	Elementos tablero de potencia y cableado	350,00	350,00
1	Circuito Amplificador	80,00	80,00
1	Computadora DELL i5 RAM 8GB-64bits	1200	1200
1	Tuberías y accesorios	100,00	100,00
	TOTAL		3112,76

Nota: Todos los precios ya consta el IVA

El Costo de la implementación de este proyecto es relativamente alto, considerando que para esto se debió de adquirir algunos de sus elementos en diferentes ciudades. Esto se debió a que en el mercado local no existían en stock de los diferentes proveedores que se consultó y su tiempo de importación debido a la cantidad solicitada era considerablemente extenso.

4.4.1. Gastos indirectos:

El desarrollo del proyecto se lleva a cabo en un periodo de 9 meses (Agosto 2014- Abril 2015), en estos gastos se incluye transporte, alimentación los mismos que se estima un costo de 1000 USD.

4.4.2. Costo total del proyecto:

En el costo total del proyecto se incluye el de los equipos y materiales más los gastos indirectos, finalmente este proyecto tendrá un valor de **4112.76 dólares.**

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ✓ Para el desarrollo exitoso del proyecto, fué primordial recopilar y analizar fundamentos teóricos relacionados al control inteligente, con la finalidad de adquirir una perspectiva clara y objetiva de los temas, dándole un enfoque correcto al diseño y construcción de un controlador inteligente.
- ✓ Con la información recopilada de fuentes bibliográficas y digitales se verificó que los controles empleados para este proyecto no requieren de un modelo matemático como su principal característica para la construcción del mismo, por lo que se emplea un lenguaje heurístico, que no es más que la utilización de un lenguaje propio del ser humano, para la toma de decisiones, en el comportamineto y desempeño del control de la planta, es importante notar que este lenguaje debe ser de fácil comprensión y entendimiento para que el programador pueda realizar un buen diseño del controlador.
- ✓ Como se ha podido apreciar durante el desarrollo del presente trabajo, se implementaron dos controles inteligentes (fuzzy y neuronal), los mismo que se realizaron en dos etapas, la primera consiste en simular el proceso mediante la plataforma de MATLAB y la otra parte se realizó de manera práctica en LABVIEW, en ambos casos sus respuestas son satisfactorias, ya que mostraron cercanía con las respuestas esperadas tomadas experimentalmente en la planta física.
- ✓ Al momento de probar el diseño del controlador difuso en la planta real, ésta se encontró inestable, a tal inconveniente, hubo la necesidad de implementar un control integrador al diseño, que ayude

a eliminar el error entre la variable de proceso y el Set-Point para que el sistema se estabilice.

- ✓ En base a la parte experimental, el control Difuso presentó mejor respuesta de la variable de proceso al accionar el actuador, mientras que el control neuronal se mostró lento al arranque de la bomba.
- ✓ En la parte real, el control neuronal denotó mayor rapidez que el Difuso, estabilizando su variable de proceso con mayor eficiencia; esto quiere decir, que los puntos designados al entrenamiento de la red fueron los adecuados.
- ✓ Si bien el control neuronal presentó mejor tiempo de estabilización que el Difuso, este último brinda menor error entre la variable de proceso y el Set-Point cuando las dos señales se encuentran en estado estable, esto se produce, gracias a la acción integral que tiende a cero a medida que el tiempo transcurre.
- ✓ La planta presentó inconvenientes al tomar la señal de voltaje analógico del sensor, a causa de pérdidas de potencial en el conexionado, por lo tanto aquella señal no llegaba a la interface; con aquel problema, se montó un acondicionamiento de señal, donde primero elevó el voltaje original y luego transformó dicha tensión a corriente, evitando pérdidas en el cable.
- ✓ Dentro de la toma de datos en las pruebas experimentales, se añadieron aditivos al agua común, tales como: anilina, cloro, detergente, para comprobar si la medida en el tanque era similar en todas; esto presentó inconvenientes de precisión y aforo del tanque, y problemas de calibración del sensor.
- ✓ Como se pudo observar en el capítulo 3, para la selección de los elementos mecánicos se utilizó una variedad de cálculos y ecuaciones, los cuales tomaron mucho tiempo en realizarlos de manera escrita, con la finalidad de escoger de manera correcta la bomba, tuberías, accesorios, ya que las mismas definen el tipo de comportamiento de la planta para llevar a cabo determinado proceso.

- ✓ A lo que se dió una respuesta afirmativa a la hipótesis planteada, donde se observó que es posible generar mejores resultados de control, utilizando metodologías inteligentes para el proceso o planta, en comparativa a métodos tradicionales.
- ✓ Es importante destacar, que aquella afirmación, se ratifica gracias a ventajas substanciales encontradas en cada una de las metodologías desarrolladas en el presente; así mismo se ponderan las más importantes tanto para el control Difuso como para el Neuronal.
- ✓ Dentro del control Difuso, existe una ventaja enorme con respecto al diseño del controlador, ya que no es imprescindible un modelo matemático para la conformación del mismo, como lo podrían requerir varios controladores tradicionales, si no implica a la mayoría de ellos. El hecho de no necesitar modelos complejos, brinda mayor flexibilidad al control del proceso, ya que el programador en base a decisiones lingüísticas de fácil comprensión y entendimiento, puede dotar de un mejor desempeño a la planta.
- ✓ Por otro lado, el control en base a Redes Neuronales, es un método que si bien necesita de investigación extensa acerca del mismo, tiene la enorme capacidad de aprender por sí solo y tomar decisiones autónomas; es decir, que el programador parte de un sistema finito para dotar al entrenamiento de la red y obtener resultados finitos, para que a posterior, ésta infiera en un universo infinito y obtener resultados de la misma clase.

5.2. Recomendaciones

- ✓ Las soluciones que se presentó en el control simulado dentro del proceso, son favorables, ya que en la parte práctica a veces se perdía la señal y por ende no existía un control. Por esta razón fue que el control simulado responde de mejor manera a las respuestas esperadas.

- ✓ Se recomienda mejorar el diseño de los conjuntos difusos y utilizar un control integrador para eliminar el error en estado estable de la planta y evitar su inestabilidad.
- ✓ Se puede mejorar el desempeño de la planta en el arranque del actuador, dotando a la red Neuronal de más puntos de referencia para su entrenamiento y así pueda responder de inmediato cuando la bomba de marcha.
- ✓ En base a la experiencia ganada, se podría mejorar el tiempo de estabilización de la planta, al editar el conjunto difuso de salida o la vez su rango de acción, así como también se podría jugar con el integrador y conseguir mejores resultados.
- ✓ Se puede minimizar el error de estabilización en la red Neuronal con respecto al tiempo, entrenando a la misma con mayor cantidad de datos.
- ✓ Al trabajar con un sensor ultrasónico se dan varios tips tales como: utilizar un acondicionamiento de señal o trabajar con señales digitales incluso señales con ancho de pulsos para evitar pérdidas de potencial en el cable y garantizar una buena señal de control.
- ✓ Se recomienda para la toma de medidas trabajar con un solo tipo de líquido para evitar errores de medida y la constante calibración del sensor ultrasónico.
- ✓ Para la selección de la bomba y los elementos constitutivos de la planta de nivel se recomienda utilizar el formato (ver Anexo D) en el cual ya esta inmerso las fórmulas necesarias, con la finalidad de tomarse el menor tiempo posible en este proceso.
- ✓ Se recomienda verificar su correcto funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos (NI MyDaq) después de ser adquirida de cualquier proveedor dentro o fuera de la ciudad, para no tener inconvenientes en el transcurso de la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [3] P. Ponce Cruz, Inteligencia artificial aplicado a la ingeniería, México, D.F.: Alfaomega S.A. de C.V..
- [6] P. Ponce Cruz, «Inteligencia artificial aplicado a la Ingeniería,» México, D.F., Alfaomega S.A. de C.V., pp. 193, Cap. III.
- [7] J. Hilera y V. Martínez, Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones, Madrid: RA-MA, 1995.
- [8] M. Bonifacio y A. Sanz, Redes Neuronales y Sistemas Borrosos, vol. Segundo, Madrid RA-MA, 2002.
- [9] S. Haykin, Neural Networks; A Comprehensive Foundation, vol. Segundo, Pentrice Hall.España
- [10] N. Instruments, Datasheet MyDAQ, Manual de Usuario, 2011.
- [11] J. R. Lajara, Labview, Entorno Gráfico de Programación, España: Alfaomega, 2009.
- [12] H. Demuth y M. Beale, Neural Network Toolbox For Use With, vol. Cuarto, El Salvador The Math Works.
- [13] R. Mott, «Mecánica de fluidos aplicada,» , pp. 382, Cap.13.
- [14] C. Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, México, D.F.: Oxford, 2001.
- [15] G. Álvarez, Instalaciones Hidráulicas I, México, D.F. 2007.
- [16] C. Smith y A. Corripio, Control automatico de procesos teoría y práctica, vol. Primero, España, 1991.
- [18] H. Eríquez, Elementos de Diseño de las Instalaciones Eléctricas Industriales, vol. Segundo, Noruega: Limusa, 2002.

NETGRAFÍA

- [1] A. Pérez, «Sistemas de Depositos Acoplados,» 12 de Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.control-systemsprinciples.co.uk>.
- [2] «Sistemas de Lazo Abierto/Cerrado,» Lycos, 6 Octubre de 2014 [En línea]. Available: http://usuarios.lycos.es/automatica/temas/tema2/pags/la_lc/lalc.htm, 2009-02-23.
- [3] «Sistemas de Lazo Abierto,» Lycos, 11 de Enero del 2015 [En línea]. Available: http://usuarios.lycos.es/automatica/temas/tema2/pags/la_lc/la.htm,.
- [5] O. Duarte, «Sistemas de Lógica Difusa - Fundamentos,» 20 de Febrero del 2015 [En línea]. Available: <http://atenea.unicauca.edu.co/~wpantoja/web/inteligenciaartificial/fuzzy.pdf>, 2009-02-24. [Último acceso: 24 Febrero 2009].
- [6] E. Vallejo, «Diseño de Controladores Difusos,» 1 Marzo 2015. [En línea]. Available: http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/10/aplicacion_de_l_control_difusion.pdf, página 77, 5 de Mayo del 2015.

ANEXOS

ANEXO A.

**Características de la
Estructura (Tubo
cuadrangular).**

ANEXO B.

Propiedades de la plancha de madera MDF

ANEXO C.

Propiedades del acrílico

ANEXO D.

Características bomba thebe

ANEXO E.

**Características ruedas
móviles**

ANEXO F.

Especificaciones técnicas Ni

My Daq

ANEXO G.

**Datos técnicos sensor
ultrasónico**

ANEXO H.

Características variador de velocidad

ANEXO I.
Planos eléctricos

ANEXO J.

**Características fusible y
porta-fusible**

ANEXO K.

Características interruptor magneto térmico

ANEXO L.

Características guardamotor

ANEXO M.

Características contactor

ANEXO N.

**Conductor eléctrico circuito
de control**

ANEXO O.

Conductor eléctrico circuito de potencia

ANEXO P.

Conductor eléctrico para la bomba

ANEXO Q.
Conductor eléctrico
apantallado

ANEXO R.

Circuito Amplificador AD

620

ANEXO S.

Circuito Rectificador LF 353

ANEXO T.
Gráficas control difuso
LABVIEW

ANEXO U.
Gráficas control neuronal
LABVIEW

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por las Señores Juan Pablo León Calderón y José Carlos Garcés Pico bajo mi supervisión.

.....
ING. FABRICIO PÉREZ
DIRECTOR

.....
ING. FREDDY SALAZAR
CODIRECTOR

.....
ING. KATYA TORRES
DIRECTORA DE LA CARRERA

.....
DR. RODRIGO VACA
SECRETARIO ACADÉMICO