



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO, RECONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN
DEL MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL,
CAUDAL Y TEMPERATURA BASADO EN AUTÓMATAS
PROGRAMABLES USANDO SOFTWARE LIBRE**

**AUTORES: NASIMBA VILLARREAL, EDWIN STALIN
RÍOS HIDALGO, SIMÓN ERNESTO**

DIRECTOR: ING. TIPÁN CONDOLO, EDGAR FERNANDO

SANGOLQUÍ

2016

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO, RECONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y TEMPERATURA BASADO EN AUTÓMATAS PROGRAMABLES USANDO SOFTWARE LIBRE" realizado por los señores Nasimba Villarreal Edwin Stalin y Ríos Hidalgo Simón Ernesto, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores Nasimba Villarreal Edwin Stalin y Ríos Hidalgo Simón Ernesto para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 30 de noviembre del 2016



Ing. Tipán Condolo Edgar Fernando
DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Nasimba Villarreal Edwin Stalin, con cédula de identidad N° 171522746-6, y Ríos Hidalgo Simón Ernesto, con cédula de identidad N° 172264668-2, declaramos que este trabajo de titulación, "DISEÑO, RECONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y TEMPERATURA BASADO EN AUTÓMATAS PROGRAMABLES USANDO SOFTWARE LIBRE" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 30 de noviembre del 2016.

Nasimba Villarreal Edwin Stalin
C.C 171522746-6

Ríos Hidalgo Simón Ernesto
C.C 172264668-2

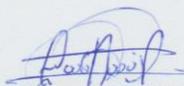
AUTORIZACIÓN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

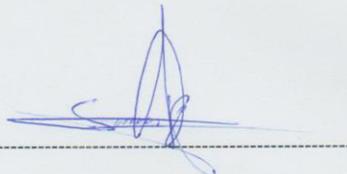
AUTORIZACIÓN

Nosotros, Nasimba Villarreal Edwin Stalin y Ríos Hidalgo Simón Ernesto, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación, "DISEÑO, RECONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y TEMPERATURA BASADO EN AUTÓMATAS PROGRAMABLES USANDO SOFTWARE LIBRE" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 30 de noviembre del 2016.



Nasimba Villarreal Edwin Stalin
C.C 171522746-6



Ríos Hidalgo Simón Ernesto
C.C 172264668-2

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por su apoyo incondicional por nunca dejar de creer en mí, especialmente a mis padres Marcia Villarreal y José Nasimba por haberme forjado con buenos hábitos y valores los cuales me ayudaran a salir adelante en la vida.

Edwin Nasimba

Dedico este trabajo a Dios por permitirme culminar mi carrera, haberme guiado por buen camino y ser mi refugio en momentos difíciles.

A mis padres, hermano y familiares cercanos, quienes han sabido aconsejarme, comprenderme y ayudarme incondicionalmente, quienes han sido un fiel ejemplo de lucha, y me han demostrado que con esfuerzo y perseverancia se pueden alcanzar las metas planteadas.

Simón Ríos

AGRADECIMIENTO

Al concluir el presente trabajo de tesis de grado queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a:

- La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE por su apoyo institucional para la realización del presente proyecto de grado.
- A los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE por habernos impartido sus conocimientos durante todo el tiempo que duro la carrera.
- Al Ing. Edgar Tipán, director de nuestra tesis, por habernos brindado apoyo y guía durante el desarrollo de nuestra tesis.
- A nuestro equipo de estudio por su apoyo incondicional en la realización de deberes, proyectos y pruebas durante el transcurso de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. GENERAL.....	2
1.2.2. ESPECÍFICOS.....	2
1.3. ALCANCE.....	2
1.4. ESTADO DE LA CIENCIA	3
1.4.1. CONTROLADORES	3
1.4.2. PLC ARDUINO	5
1.4.3. SENSORES Y ACTUADORES.....	5

1.4.4. HMI	5
1.4.5. SOFTWARE LIBRE	6
CAPÍTULO II	7
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	7
2.1. FLUIDO	7
2.1.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO	7
2.1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	7
2.2. TUBERÍAS.....	7
2.2.1. DEFINICIÓN DE TUBERÍA.....	7
2.2.2. TIPOS DE TUBERÍA.....	8
2.2.2.1. TUBERÍAS DE COBRE.....	8
2.2.2.2. TUBERÍAS DE HIERRO GALVANIZADO	8
2.2.2.3. TUBERÍAS DE PVC	9
2.2.2.4. TUBERÍAS DE CPVC.....	9
2.2.2.5. TUBERÍAS DE PPR	10
2.2.2.6. TUBERÍAS FLEXIBLES DE METAL O PLÁSTICO	10
2.3. TANQUES DE AGUA	11
2.3.1. DEFINICIÓN DE TANQUE DE AGUA	11
2.3.2. TIPOS DE TANQUE DE AGUA	11
2.3.2.1. TANQUES DE POLIETILENO.....	11
2.3.2.2. TANQUES DE ACERO INOXIDABLE	12
2.3.2.3. TANQUES DE ACRÍLICO	12
2.4. BOMBAS DE AGUA	13
2.4.1. DEFINICIÓN DE BOMBA DE AGUA	13

2.4.2.	CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE AGUA	13
2.5.	NIVEL	14
2.5.1.	DEFINICIÓN DE NIVEL	14
2.5.2.	SENSORES DE NIVEL	14
2.5.2.1.	SENSORES DE Sonda O DE VARA	14
2.5.2.2.	SENSORES DE CRISTAL	14
2.5.2.3.	SENSOR DE FLOTADOR	15
2.5.2.4.	SENSOR CAPACITIVO	16
2.5.2.5.	SENSOR DE ULTRASONIDO	16
2.6.	CAUDAL	17
2.6.1.	DEFINICIÓN DE CAUDAL	17
2.6.2.	SENSORES DE CAUDAL	17
2.6.2.1.	CAUDALÍMETROS DE PRESIÓN DIFERENCIAL	17
2.6.2.2.	CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS	17
2.6.2.3.	CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS	18
2.7.	TEMPERATURA	18
2.7.1.	DEFINICIÓN DE TEMPERATURA	18
2.7.2.	SENSORES DE TEMPERATURA	18
2.7.2.1.	TERMISTORES	18
2.7.2.2.	RTD	19
2.7.2.3.	TERMOPAR	19
2.8.	SISTEMA DE CONTROL	19
2.8.1.	SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO	19
2.8.2.	SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO	20

2.8.3. CONTROL PID	20
2.8.3.1. MÉTODO DE OSCILACIÓN.....	21
2.8.3.2. MÉTODO BASADO EN LA CURVA REACCIÓN	22
2.8.3.3. MÉTODO USANDO SOFTWARE	22
2.9. CONTROL FUZZY	23
2.10. PLC	24
2.11. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y PROCESO	24
CAPÍTULO III.....	29
3. DISEÑO Y SELECCIÓN	29
3.1. CRITERIO DE DISEÑO.....	29
3.2. INSPECCIÓN GENERAL DEL EQUIPO EXISTENTE	30
3.2.1. ESTADO INICIAL DEL EQUIPO.....	30
3.2.1.1. DIAGNÓSTICO DEL BASTIDOR	31
3.2.1.2. DIAGNÓSTICO DE LA CAJA DE CONTROL.....	32
3.2.1.3. DIAGNÓSTICO DEL PANEL DE CONTROL	33
3.2.1.4. DIAGNÓSTICO DE LOS TANQUES DE AGUA.....	34
3.2.1.5. DIAGNÓSTICO DE LAS TUBERIAS.....	34
3.2.1.6. DIAGNÓSTICO DE ACTUADORES.....	34
3.2.1.7. DIAGNÓSTICO DE SENSORES.....	38
3.2.1.8. SENSOR DE TEMPERATURA	38
3.3. SISTEMA MECÁNICO	39
3.3.1. DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN	39
3.3.1.1. TUBERÍA DEL SISTEMA	39

3.3.2. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LÍQUIDO	43
3.3.2.1. TANQUE DE RESERVORIO DE LÍQUIDO	45
3.3.2.2. DEPÓSITO DE LÍQUIDO	50
3.4. ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO	55
3.4.1. SELECCIÓN DEL SENSOR DE NIVEL	55
3.4.2. SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA	56
3.4.3. SELECCIÓN DEL SENSOR DE CAUDAL	57
3.4.4. SELECCIÓN DE LA NIQUELINA	59
3.4.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE	59
3.4.6. PANEL DE CONTROL	61
3.4.6.1. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL DE CONTROL	61
3.4.6.2. LUCES INDICADORAS	71
3.4.7. PANEL DE CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTOS	74
3.4.7.1. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO ELECTROVÁLVULAS	74
3.4.7.2. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO NIQUELINA	75
3.4.7.3. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO BOMBAS	76
3.4.7.4. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL DE CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO	77
3.4.8. INSTALACIONES ELÉCTRICAS	82
CAPÍTULO IV	87
4. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO	87
4.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PI PARA CONTROL DE NIVEL	87
4.1.1. OBTENCIÓN DE LA PLANTA	87

4.1.2. DISEÑO DEL CONTROLADOR	89
4.2. DISEÑO DEL CONTROLADOR FUZZY PARA CONTROL DE CAUDAL.....	90
4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR FUZZY PARA CONTROL DE TEMPERATURA	98
4.4. DISEÑO DEL LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA	106
CAPÍTULO IV.....	112
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	112
5.1. PRUEBAS Y CORRECCIONES EN TANQUES DE AGUA Y TUBERÍAS	112
5.2. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	112
5.3. PRUEBAS Y CORRECCIONES PANEL DE CONTROL.....	112
5.4. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN DEL COMPUTADOR CON EL PLC M-DUINO.....	113
5.5. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR HC-SR04	113
5.6. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR YF-S201.....	115
5.7. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR DB18B20	117
5.8. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS EN EL SISTEMA DE CONTROL	117
5.9. PRUEBAS EN LOS FUSIBLES.....	117
5.10. GUÍAS DE LABORATORIO	118
CAPÍTULO VI.....	129
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
6.1. CONCLUSIONES.....	129
6.2. RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros de ajuste método de oscilación	21
Tabla 2	Parámetros de ajuste método curva reacción.....	22
Tabla 3	Resumen inspección equipo	30
Tabla 4	Características electroválvula	35
Tabla 5	Distribución de elementos del reservorio al depósito	41
Tabla 6	Distribución de elementos del depósito al reservorio	42
Tabla 7	Propiedades mecánicas y ópticas del acrílico.....	43
Tabla 8	Propiedades térmicas y físicas del acrílico	44
Tabla 9	Información de la malla del reservorio	47
Tabla 10	Detalles de la malla del reservorio	47
Tabla 11	Estudio de tensiones del reservorio	48
Tabla 12	Estudio de desplazamientos del reservorio.....	48
Tabla 13	Estudio de deformaciones unitarias del reservorio	49
Tabla 14	Información de la malla del depósito.....	51
Tabla 15	Detalles de la malla del depósito	52
Tabla 16	Estudio de tensiones del depósito	52
Tabla 17	Estudio de desplazamientos del depósito	53
Tabla 18	Estudio de deformaciones unitarias del depósito	54
Tabla 19	Características sensor HC-SR04	55
Tabla 20	Características Sensor YF-S201	58
Tabla 21	Detalle distribución panel de control	65
Tabla 22	Distribución sección parada de emergencia, conexión usb/ethernet, encendido/apagado.....	66
Tabla 23	DISTRIBUCIÓN PINES DEL PLC en el tablero sección 4	67
Tabla 24	Distribución sección sensores.....	68
Tabla 25	Distribución sección actuadores	69
Tabla 26	Distribución sección fuentes de voltaje	70
Tabla 27	Distribución sección simbología conectores jack hembra	71

Tabla 28	Detalle distribución circuitos de acondicionamiento	79
Tabla 29	Distribución sección circuito de acondicionamiento válvulas	79
Tabla 30	Distribución sección circuito de acondicionamiento bombas	80
Tabla 31	Distribución sección circuito de acondicionamiento níquelina.....	81
Tabla 32	Distribución sección circuito de acondicionamiento níquelina.....	82
Tabla 33	Tabla de voltajes y corrientes que circular por el cableado.....	82
Tabla 34	Tabla Distribución de señales	83
Tabla 35	Datos Sensor Ultrasónico	87
Tabla 36	Matriz de variables	91
Tabla 37	Matriz de variables	99
Tabla 38	Datos del sensor HC-SR04.....	114
Tabla 39	Datos del sensor YF-S201	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Control PID de una planta	3
Figura 2 Lazo de control difuso.....	4
Figura 3 Tubería de cobre	8
Figura 4 Tubería de hierro galvanizado	8
Figura 5 Tubería de PVC	9
Figura 6 Tubería de CPVC	9
Figura 7 Tubería de PPR	10
Figura 8 Tuberías flexibles.....	10
Figura 9 Tanques de polietileno.....	11
Figura 10 Tanque de acero inoxidable	12
Figura 11 Tanques de acrílico	13
Figura 12 Sensor de sonda o de vara.....	14
Figura 13 Sensores de cristal	15
Figura 14 Sensor de flotador	15
Figura 15 Sensor capacitivo	16
Figura 16 Sensor de ultrasonido.....	16
Figura 17 Sistema de control en lazo abierto.....	20
Figura 18 Sistema de control en lazo cerrado	20
Figura 19 Lazo cerrado con ganancia proporcional.....	21
Figura 20 Sección de configuración PIDTOOL.....	23
Figura 21 Interfaz programación controlador FUZZY	23
Figura 22 Modular didáctico - Sistema.....	25
Figura 23 Diagrama-proceso de control de nivel	26
Figura 24 Diagrama-proceso de control de caudal	27
Figura 25 Diagrama-proceso de control de temperatura	28
Figura 26 Bastidor – Estado Inicial	32
Figura 27 Bastidor - Estado inicial	32
Figura 28 Caja de Control – Estado Inicial.....	33

Figura 29 Panel de Mando – Estado inicial.....	33
Figura 30 Electroválvula AIRTAC	35
Figura 31 Datos técnicos electroválvulas.....	35
Figura 32 Bomba de Agua	36
Figura 33 Bomba de Agua	37
Figura 34 Diagrama General de Actuadores y Sensores.....	39
Figura 35 Rediseño tubería del reservorio al depósito	40
Figura 36 Rediseño tubería del depósito al reservorio	41
Figura 37 Reservorio	45
Figura 38 Reservorio instalado en el módulo.....	49
Figura 39 Deposito	50
Figura 40 Depósito instalado en el módulo.....	54
Figura 41 Sensor DS18B20	56
Figura 42 Distribución pines sensor DS18B20	57
Figura 43 Curva característica sensor DS18B20.....	57
Figura 44 Sensor YF-S201	58
Figura 45 Niquelina	59
Figura 46 PLC MDUINO 42I/Os.....	60
Figura 47 Especificaciones PLC MDUINO 42I/Os	60
Figura 48 Bornera para PCB	61
Figura 49 Jack Hembra.....	62
Figura 50 Led Jumbo	62
Figura 51 Tomacorriente 110 VAC	62
Figura 52 Switch de Encendido/Apagado	63
Figura 53 Botón hongo paro de emergencia.....	63
Figura 54 Cable USB.....	63
Figura 55 Caja de empalme acoplador Ethernet	64
Figura 56 Dimensiones panel de control.....	64
Figura 57 Distribución del panel de control.....	65
Figura 58 Distribución sección elemento 1,2 y3.	66

Figura 59 Distribución pines del PLC en el tablero	67
Figura 60 Distribución sección sensores	68
Figura 61 Distribución sección actuadores	69
Figura 62 Distribución sección fuentes de voltaje	70
Figura 63 Distribución sección simbología conectores jack hembra.....	71
Figura 64 Circuito de un solo lazo con dos resistores en serie.....	72
Figura 65 Divisores de tensión	73
Figura 66 Panel de control instalado en el módulo	73
Figura 67 Circuito de acondicionamiento electroválvulas	74
Figura 68 Placa circuito de acondicionamiento.....	74
Figura 69 Distribución de elementos	75
Figura 70 Circuito de acondicionamiento niquelina	75
Figura 71 Placa circuito de acondicionamiento.....	76
Figura 72 Distribución de elementos	76
Figura 73 Circuito de acondicionamiento bombas	77
Figura 74 Placa circuito de acondicionamiento.....	77
Figura 75 Distribución de elementos	77
Figura 76 Dimensiones panel circuitos de acondicionamiento	78
Figura 77 Distribución del panel circuitos de acondicionamiento.....	78
Figura 78 Distribución sección circuito de acondicionamiento válvulas	79
Figura 79 Distribución sección circuito de acondicionamiento bombas	80
Figura 80 Distribución sección circuito de acondicionamiento niquelina	81
Figura 81 Distribución sección tomacorriente 110 VAC.....	81
Figura 82 Panel circuitos de acondicionamiento instalado en el módulo	82
Figura 83 Distribución del cableado de alimentación de fuentes.....	83
Figura 84 Cableado señales electroválvulas	84
Figura 85 Cableado de señales niquelina.....	84
Figura 86 Cableado de señales bombas	85
Figura 87 Cableado de señales sensores.....	85
Figura 88 Módulo didáctico final	86

Figura 89 Importación de datos	88
Figura 90 Asignación de polos y ceros	88
Figura 91 Control PI planta nivel.....	89
Figura 92 Parámetros del controlador	90
Figura 93 Configuración de entradas y salidas.....	91
Figura 94 Rango temperatura BAJA.....	92
Figura 95 Rango temperatura NORMAL.....	92
Figura 96 Rango temperatura ALTA.....	93
Figura 97 Rango error BAJO	93
Figura 98 Rango error MEDIO.....	94
Figura 99 Rango error ALTO	94
Figura 100 Rango potencia BAJA.....	95
Figura 101 Rango potencia MEDIA	95
Figura 102 Rango potencia ALTA.....	96
Figura 103 Programación reglas de control FUZZY	96
Figura 104 Relación temperatura-error-potencia.niquelina.....	97
Figura 105 Relación temperatura-potencia.niquelina	97
Figura 106 Relación error-potencia.niquelina	98
Figura 107 Configuración de entradas y salidas.....	99
Figura 108 Rango temperatura BAJA.....	100
Figura 109 Rango temperatura NORMAL.....	100
Figura 110 Rango temperatura ALTA.....	101
Figura 111 Rango error BAJO	101
Figura 112 Rango error MEDIO.....	102
Figura 113 Rango error ALTO	102
Figura 114 Rango potencia BAJA.....	103
Figura 115 Rango potencia MEDIA	103
Figura 116 Rango potencia ALTA.....	104
Figura 117 Programación reglas de control FUZZY	104
Figura 118 Relación temperatura-error-potencia.niquelina.....	105

Figura 119 Relación temperatura-potencia.niquelina	105
Figura 120 Relación error-potencia.niquelina	106
Figura 121 Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz	107
Figura 122 Arquitectura HMI.....	107
Figura 123 Navegación sección portada.....	108
Figura 124 Navegación sección controladores	108
Figura 125 Navegación sección modo manual	108
Figura 126 HMI sección portada.....	109
Figura 127 HMI sección control temperatura	109
Figura 128 HMI sección control nivel.....	110
Figura 129 HMI sección control caudal.....	111
Figura 130 HMI sección modo manual	111
Figura 131 Reconocimiento del PLC como dispositivo	113
Figura 132 Reconocimiento del PLC en el IDE de Arduino	113
Figura 133 Respuesta del Sensor HC-SR04	115
Figura 134 Respuesta del Sensor YF-S201	116
Figura 135 Señal	119
Figura 136 Lazo de control	121
Figura 137 Control Fuzzy.....	127

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó, reconstruyó e implementó un modular didáctico para la realización de prácticas de control de nivel, caudal y temperatura para el laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la Universidad del Fuerzas Armadas – ESPE. El modular está constituido por un bastidor que sirve de soporte para el sistema, este sistema consta de dos tanques, uno que tiene la función de reservorio de agua y otro de depósito de agua, además se dispone de dos bombas y dos electroválvulas que se encargan del transporte de líquido de un tanque a otro a través de un conjunto de tuberías. También se cuenta con una niquelina que sirve para elevar la temperatura del líquido del reservorio. El modular posee tres sensores para la medición de nivel, caudal y temperatura respectivamente. La característica fundamental del proyecto realizado es que se hizo uso de un controlador lógico programable basado en software libre, conocido industrialmente como PLC M-DUINO. Se utilizó este PLC para el control de los actuadores y la adquisición de datos de los sensores. Además, se realizó el diseño e implementación de un panel de control para realizar de una manera didáctica la conexión de sensores, actuadores y pines del PLC. Como resultado se obtuvo un modular didáctico de fácil uso, con un controlador robusto y que puede utilizarse para prácticas que permitan simular un ambiente industrial.

Palabras Claves

- **M-DUINO**
- **SOFTWARE LIBRE**
- **NIVEL**
- **TEMPERATURA**
- **CAUDAL.**

ABSTRACT

In the present project, a didactic module was designed, reconstructed and implemented for the practice of level, flow and temperature control for the Laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica of the Universidad del Fuerzas Armadas – ESPE. The didactic module is constituted by a frame that serves as support for the system, this system consists of two tanks, one that has the function of water reservoir and another of water tank, in addition there are two bombs and two solenoid valves that have the function of transporting liquid from one tank to another through a set of pipes. There is also a nickel that serves to raise the temperature of the liquid in the reservoir. The modular has three sensors for the measurement of level, flow and temperature respectively. The fundamental characteristic of the project is that a programmable logic controller based on free software was used, known industrially as PLC M-DUINO. This PLC was used for the control of actuators and the acquisition of sensor data. In addition, the design and implementation of a control panel was carried out in order to perform the connection of sensors, actuators and pins of the PLC in a didactic way. As a result, an easy-to-use didactic modular was obtained, with a robust controller and that can be used for practices that simulate an industrial environment.

Keywords

- **M-DUINO**
- **FREE SOFTWARE**
- **LEVEL.**
- **TEMPERATURE.**
- **FLOW.**

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

El control automático de procesos desempeña un papel importante en el progreso industrial. Este progreso se ha llevado a cabo mediante la evolución de las técnicas de medición y control. Una de las principales razones para el uso del control automático de procesos es la reducción de costos y errores al momento de realizar procesos industriales.

En la actualidad, el sector industrial debe satisfacer las exigencias requeridas por el usuario, al mismo tiempo que intenta reducir el impacto ambiental causado por los diferentes procesos de producción. Esto se está logrando mediante la implementación de control automático, ya que de esta manera se permite tener un funcionamiento óptimo de sistemas, mejorando la calidad y reduciendo los costos de producción, tomando en cuenta materiales y procesos usados, con el fin de reducir el daño causado al medio ambiente.

La implementación de este tipo de control se puede realizar por medio del uso de un autómatas programable o PLC (Programmable Logic Controller), el cual se define según un informe publicado por la Universidad de Oviedo (citado en Karl-Heinz, 2001) como una máquina electrónica programable diseñada para ser utilizada en un entorno industrial, que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar soluciones específicas tales como funciones lógicas, secuencias, temporizaciones, recuentos y funciones aritméticas, con el fin de controlar mediante entradas y salidas, digitales y analógicas diversos tipos de máquinas o procesos.

Para poder hacer uso de este tipo de máquina electrónica se requiere del uso de software, en la mayoría de los casos se requiere comprar licencias para poder hacer uso de los mismos. Por este motivo, muchas empresas del sector industrial no pueden implementar el control automático.

El uso de software libre es una herramienta que está tomando importancia dentro del sector industrial, ya que ofrece muchos beneficios, entre ellos se destacan, reducir de manera considerable los gastos por licenciamiento y promover la inversión en innovación.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GENERAL

Diseñar, reconstruir e implementar el modular didáctico para control de nivel, caudal y temperatura ubicado en el Laboratorio de Automatización Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas, basado en autómatas programables usando software libre.

1.2.2. ESPECÍFICOS

- Diseñar y reconstruir el modular didáctico para control de nivel, caudal y temperatura. Realizar el mantenimiento y reemplazo de componentes dañados.
- Realizar el control del sistema usando un autómata programable, el cual puede ser programado y configurado por medio de software libre.
- Implementar una HMI para el monitoreo y control de las variables del proceso.
- Validar el funcionamiento del módulo didáctico, ejecutando un protocolo de pruebas.

1.3. ALCANCE

El presente proyecto pretende involucrar al usuario en un ambiente industrial simulado, permitiendo realizar el control de nivel, caudal y temperatura, por medio de un PLC usando software libre, evitando de esta manera los problemas por licenciamiento que generalmente se presentan en el ámbito educativo, debido a los altos costos que demanda la adquisición de este tipo de software.

Para este propósito se diseña, reconstruye e implementa un módulo didáctico, de fácil manejo y comprensión, que permite manipular y monitorear los sensores y actuadores por medio de un panel de control y permite visualizar el estado de los mismos a través de una HMI.

1.4. ESTADO DE LA CIENCIA

1.4.1. CONTROLADORES

La selección de los controladores a usar es de gran importancia para el desarrollo del proyecto, ya que a partir de esto se realiza el modelado de la planta, el mismo el permite conocer el comportamiento tanto de sensores como de actuadores. El control del sistema se realiza por medio de dos controladores, estos son, control PID y control Fuzzy.

El control PID (Proporcional Integral Derivativo), es un tipo de control de bucle cerrado, en donde la entrada al sistema que se quiere controlar es un error calculado a partir de la salida deseada menos la salida obtenida. La estructura de un PID es la siguiente:

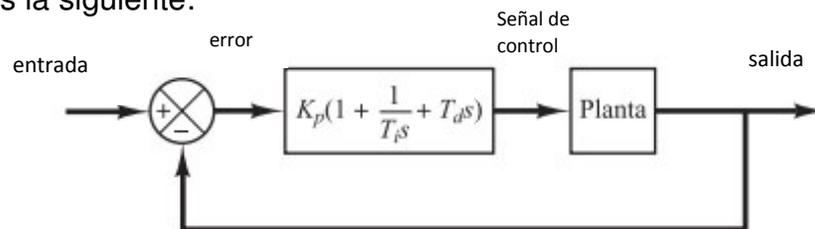


Figura 1 Control PID de una planta

Fuente: (Ogata, 2010)

En donde la acción de control proporcional da una salida del controlador que es proporcional al error. La ganancia proporcional ajustable se denomina K_p . El control proporcional se encarga de lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero, pero esto se logra pocas veces, únicamente cuando estos valores se encuentran en una determinada porción del rango total de control.

La acción de control integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado. La ganancia integral ajustable se denomina K_i . El control integral se encarga de disminuir el error en estado estacionario provocado por el control proporcional.

La acción de control derivativa se presenta al existir un cambio en el valor absoluto del error. La ganancia proporcional ajustable se denomina K_d . El control derivativo se encargará de disminuir las sobreoscilaciones.

El control Fuzzy es aquel que se basa en lo relativo de lo observado como posición diferencial.

La lógica difusa puede ser descrita como un sistema interpretativo, en el cual los objetos o elementos son relacionados con conjuntos de fronteras no nítidamente definidas, otorgándoles un grado de pertenencia relativa o graduada y no estricta como es de costumbre en la lógica tradicional. En un sentido más amplio se podría decir que existe una especie de interpolación entre una frontera y otra, o bien, entre un conjunto y otro. (Kouro, 2002)

La estructura de un control difuso está representada en la Figura 2, la cual también permite apreciar las distintas transformaciones que sufren las variables y los datos en un lazo de control difuso.

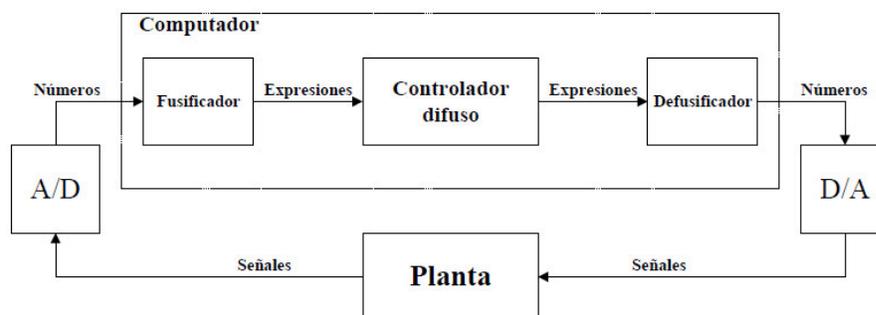


Figura 2 Lazo de control difuso

Fuente:(Kouro, 2002)

La etapa de fusificación es aquella en donde se realiza una adaptación previa antes de introducir el estado de la variable al controlador, el estado de la variable está expresado en forma lingüística. La etapa de defusificación es

aquella que traduce una actuación deseada escrita en lenguaje lingüístico a un número, para poder ser convertido a señal y poder aplicar en la planta que se desea controlar.

1.4.2. PLC ARDUINO

Es una nueva gama de PLC's elaborado por Industrial Shields. Este tipo de PLC brinda todas las características que ofrecen los PLC's existentes en el mercado actual, y está elaborado para poder ser usado en el sector industrial de manera profesional sin causar inconvenientes al operador.

Este PLC puede ser programado con el IDE de Arduino que se utiliza para programar las diferentes tarjetas. Por lo tanto, el PLC Arduino, no necesita de un software de programación que requiere licencia para poder ser configurado y programado.

1.4.3. SENSORES Y ACTUADORES

Los sensores son dispositivos diseñados para detectar información de una determinada acción externa, y transformarla en otra magnitud, generalmente eléctrica, con el fin de poder cuantificar y manipular dicha información según sea necesario. Esta información puede ser del tipo analógica o digital, y depende del tipo de sensor que se utilice.

Los actuadores son dispositivos mecánicos que tienen la función de proporcionar fuerza para modificar las variables a controlar en un sistema automatizado.

1.4.4. HMI

Las siglas HMI en español significa (Interfaz Humano Máquina). La HMI puede ser considerada como una ventana, la cual permite visualizar, controlar y monitorear el proceso realizado en un sistema automatizado. Para que una HMI sea válida necesita de dos componentes. El primer componente es la entrada, en donde el usuario le dice a la máquina que hacer, y el segundo componente es

la salida, en donde permite al usuario tener información actualizada del estado de las variables.

1.4.5. SOFTWARE LIBRE

El uso de Software Libre asegura la soberanía tecnológica, impulsa la innovación nacional, optimiza el gasto estatal fortaleciendo el desarrollo local y facilita la inclusión digital.

A nivel de la Administración Pública, el uso de Software Libre permite autonomía tecnológica, estandarización e integración, seguridad, independencia de proveedores, democratización de la información y ahorro de recursos. (Pública, 1998)

CAPÍTULO II

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.1. FLUIDO

2.1.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO

El fluido está constituido por partículas unidas entre sí por fuerzas de atracción débiles, por esta razón es que los fluidos pueden cambiar de forma sin que actúen fuerzas que intenten recuperar la forma original del mismo.

La definición de fluido de acuerdo al comportamiento que presenta “Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial” (Soriano, 2010).

2.1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos tienen propiedades físicas que les permiten distinguirse de otros materiales. Es importante conocer las propiedades de los fluidos ya que estas permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento.

El módulo didáctico para control de nivel, caudal y temperatura, utiliza como fluido de trabajo el agua, por lo tanto, se mencionan las características físicas más importantes de este fluido. Las características mencionadas están tomadas como referencia a una presión atmosférica de 760 mm de mercurio.

- Punto de fusión: 0°C
- Punto de ebullición: 100°C
- Densidad máxima: $1 \frac{\text{g}}{\text{cc}}$ a 4°C

2.2. TUBERÍAS

2.2.1. DEFINICIÓN DE TUBERÍA

Las tuberías son conductos que cumplen la función de transportar de transportar fluidos de un lado a otro.

2.2.2. TIPOS DE TUBERÍA

2.2.2.1. TUBERÍAS DE COBRE

Las tuberías de cobre se utilizan para conexiones de gas y agua, siendo las de gas más gruesas que las de agua. Este tipo de tuberías se unen usando una soldadura especial de plomo y estaño. Este tipo de tuberías son frágiles y costosas.



Figura 3 Tubería de cobre

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.2.2.2. TUBERÍAS DE HIERRO GALVANIZADO

Son tuberías que se utilizan generalmente para agua. Se caracterizan por ser resistentes a la corrosión, soportan grandes presiones, y son las menos usadas debido a que no son prácticas para uso residencial, ya que su aplicación se da en instalaciones hidráulicas.



Figura 4 Tubería de hierro galvanizado

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.2.2.3. TUBERÍAS DE PVC

Las tuberías de PVC pueden transportar agua a alta presión. Actualmente, son las más usadas, debido a su gran variedad de dimensiones, precios y aplicaciones. Con el avance tecnológico se han desarrollado tuberías de PVC capaces de transportar agua caliente, lo que hace que el uso de éstas sea práctico para instalaciones residenciales.



Figura 5 Tubería de PVC

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.2.2.4. TUBERÍAS DE CPVC

Son tuberías de uso hidráulico, ya sea con agua caliente o fría, tienen la característica de ser altamente resistentes a la corrosión y de precio accesible, motivo por el cual en la actualidad son las más usadas en instalaciones hidráulicas. Para unir este tipo de tuberías se utiliza la misma técnica que con las tuberías de PVC, se unen con un pegamento especial que sella la tubería.



Figura 6 Tubería de CPVC

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.2.2.5. TUBERÍAS DE PPR

Al igual que las tuberías de CPVC, las tuberías de PPR son usadas en instalaciones hidráulicas, con la diferencia de que tienen más vida útil y soportan presiones y temperaturas más elevadas. Para instalar las tuberías de PPR se necesita de cortadoras y soldadoras especiales.



Figura 7 Tubería de PPR

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.2.2.6. TUBERÍAS FLEXIBLES DE METAL O PLÁSTICO

Las tuberías flexibles son usadas para conexiones sencillas, como por ejemplo para conectar la llave de agua con la tubería de agua. Son fáciles de instalar lo que hace posible un mantenimiento sencillo. Internamente están hechas de tubo PVC recubierto de aluminio trenzado o cualquier otro material plástico.



Figura 8 Tuberías flexibles

Fuente: (TECMAGA, 2015)

2.3. TANQUES DE AGUA

2.3.1. DEFINICIÓN DE TANQUE DE AGUA

Los tanques son contenedores utilizados para almacenar agua, generalmente utilizados a nivel industrial como de uso doméstico, ya que debido a su gran variedad permiten solucionar problemas de suministro y almacenamiento de agua. Los tanques más utilizados son los de polietileno, acero inoxidable y acrílico.

2.3.2. TIPOS DE TANQUE DE AGUA

2.3.2.1. TANQUES DE POLIETILENO

Los tanques de polietileno son los más usados en la actualidad debido a su diversidad de usos. La empresa PLASTIGAMA ofrece tres líneas de usos, línea de uso pesado, línea standard, y línea económica. En donde los tanques de línea de uso pesado son usados para almacenar líquidos agresivos, los tanques de línea estándar para almacenar líquidos no agresivos, productos alimenticios y sólidos, y los tanques de la línea económica usados únicamente para almacenar agua.



Figura 9 Tanques de polietileno

Fuente: (PLASTIGAMA, 2013)

2.3.2.2. TANQUES DE ACERO INOXIDABLE

Son tanques exclusivamente para almacenamiento de agua potable. Estos tanques cumplen con ciertas exigencias debido a que en gran parte el agua almacenada en ellos es distribuida para consumo humano. Estos tanques tienen las características de ser indiferentes a la corrosión, no se deforman con el calor ni con el frío, no transmite olor ni sabor, y son atérmicos, es decir, protegen su contenido de temperaturas externas.



Figura 10 Tanque de acero inoxidable

Fuente: (INTEGRAL, 2013)

2.3.2.3. TANQUES DE ACRÍLICO

Los tanques de acrílico son los menos usados dentro del ambiente industrial, pero son útiles para uso educativo debido a las características que presentan. Entre las características más importantes se tiene: Son transparentes, lo que permite un constante monitoreo del fluido que se encuentra almacenado en estos, son resistentes a la intemperie, son duros, resistentes y son maleables cuando se aplica calor.



Figura 11 Tanques de acrílico

Fuente: (AliExpress, s.f.)

2.4. BOMBAS DE AGUA

2.4.1. DEFINICIÓN DE BOMBA DE AGUA

Las bombas de agua son máquinas que transforman la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido, provocando de esta manera movimiento del agua. Las bombas de agua realizan actividades como desocupar depósitos, ya sea de agua limpia o sucia, regar cultivos, o abastecer de agua a un sitio sin acceso a ella.

2.4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE AGUA

En este apartado se va a describir la clasificación de las bombas de agua según su tipo de accionamiento, siendo estas, electrobombas, bombas neumáticas, bombas de accionamiento hidráulico y bombas manuales.

Las electrobombas son aquellas que son accionadas mediante un motor eléctrico, generalmente son motores de explosión. Las bombas neumáticas de desplazamiento positivo son aquellas en las que la energía de entrada es neumática y normalmente es aire comprimido. Las bombas de accionamiento hidráulico son aquellas que transforman la energía mecánica en energía hidráulica del fluido incomprensible que mueve, y las bombas manuales que son accionadas mediante el mecanismo de balancín.

2.5. NIVEL

2.5.1. DEFINICIÓN DE NIVEL

Se entiende por nivel, a la altura a la cual llega la superficie de un fluido, en este caso el agua, a partir de una línea de referencia.

2.5.2. SENSORES DE NIVEL

2.5.2.1. SENSORES DE Sonda O DE VARA

Los sensores de sonda o de vara son varillas o reglas graduadas de longitud adaptada de acuerdo a la altura del depósito a la que se va a introducir. La lectura del nivel de agua es directa, ya que se realiza con la identificación de la parte mojada por el líquido de la varilla o regla. Este tipo de sensores se utiliza para medición de tanques sometidos a presión atmosférica.

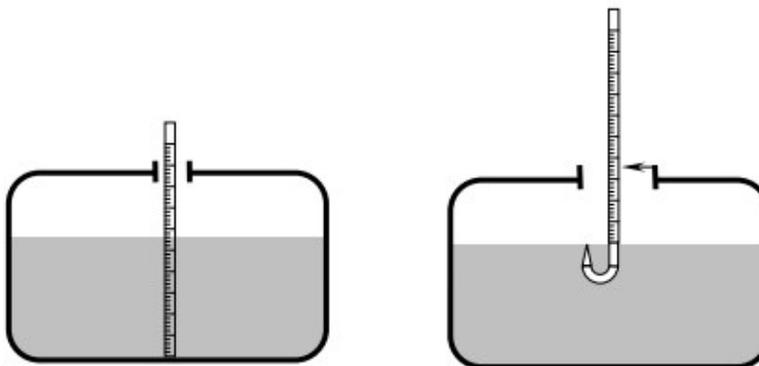


Figura 12 Sensor de sonda o de vara

Fuente: (Dulhoste, 2008)

2.5.2.2. SENSORES DE CRISTAL

Los sensores de cristal son tubos de vidrio, los cuales tienen sus extremos conectados al depósito mediante bloques metálicos y válvulas. Generalmente se usa tres válvulas, dos de ellas colocadas a los extremos del tubo que sirven de cierre de seguridad y una válvula de purga. Con el uso de estas válvulas se evita posibles fugas, y permiten realizar mantenimiento del sistema.

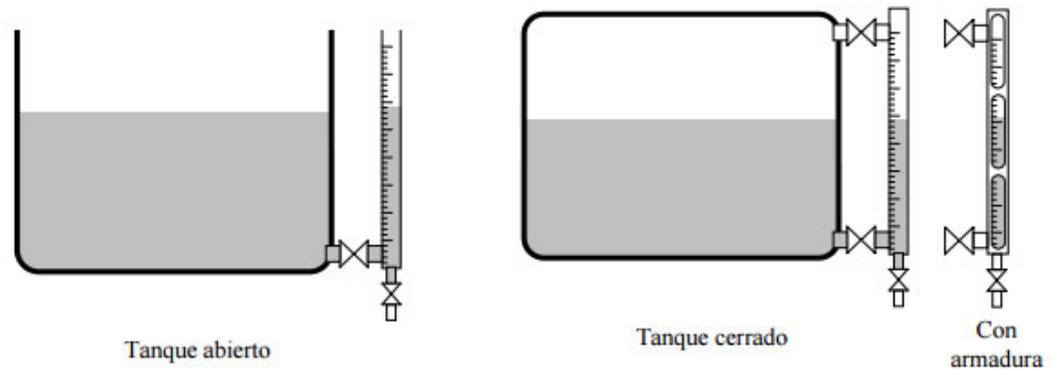


Figura 13 Sensores de cristal

Fuente: (Dulhoste, 2008)

2.5.2.3. SENSOR DE FLOTADOR

Los sensores de flotador están situados en el líquido y conectados al exterior del tanque, esta conexión hace posible que la lectura de nivel sea directa. Hay diferentes tipos de conexiones, directa, magnética, eléctrica e hidráulica. A continuación, se va a mencionar la conexión eléctrica.

Esta consta de un flotador conectada a un eje giratorio mediante un brazo, el cual hace girar el eje de un potenciómetro o desplaza la guía de un potenciómetro recto. Este es básicamente un transductor eléctrico de resistencia variable. Por lo que es usado principalmente cuando se requiere hacer la medición a distancia (Dulhoste, 2008).

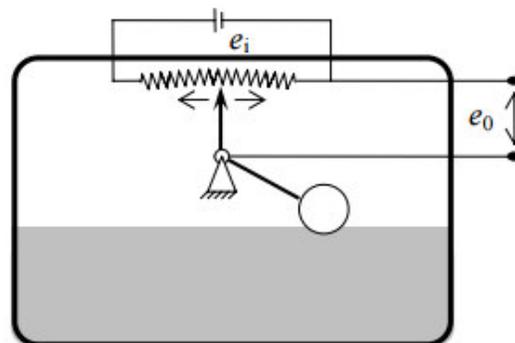


Figura 14 Sensor de flotador

Fuente: (Dulhoste, 2008)

2.5.2.4. SENSOR CAPACITIVO

Los sensores capacitivos miden la capacidad de un condensador formado por un electrodo que se encuentra sumergido en medio del tanque.

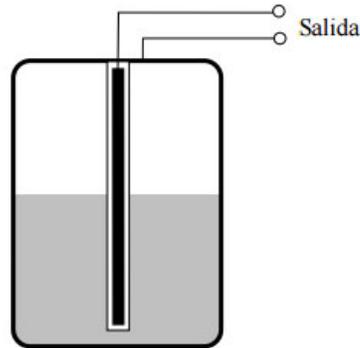


Figura 15 Sensor capacitivo

Fuente: (Dulhoste, 2008)

2.5.2.5. SENSOR DE ULTRASONIDO

Estos sensores emiten un impulso ultrasónico a la superficie, y reciben el eco de la misma. Dependiendo de la ubicación de los sensores se puede realizar diferentes tipos de aplicaciones.

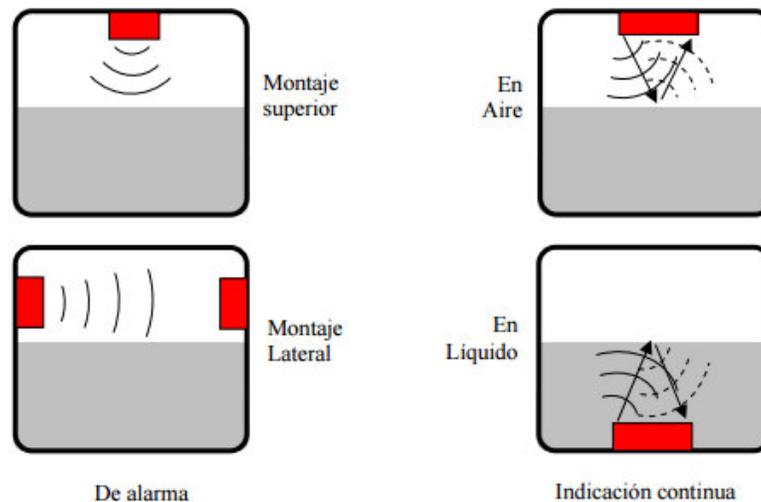


Figura 16 Sensor de ultrasonido

Fuente: (Dulhoste, 2008)

2.6. CAUDAL

2.6.1. DEFINICIÓN DE CAUDAL

En dinámica de fluidos, el caudal se define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección de tubería por unidad de tiempo.

2.6.2. SENSORES DE CAUDAL

Hay una gran variedad de sensores de caudal, cada uno con diferentes características que les permiten desenvolverse en diversos espacios, entre estas características se tiene eléctricas operativas y ambientales. A continuación, se va a detallar los sensores que tienen las características de medir fluido. Los sensores de caudal se clasifican de acuerdo a su principio de funcionamiento, en esta sección se va a explicar los caudalímetros de presión diferencial, electromagnéticos y ultrasónicos.

2.6.2.1. CAUDALÍMETROS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Los sensores de presión diferencial son los más usados a nivel industrial debido a que son simples de operar y son de bajo costo. “Su principio de funcionamiento se basa en obstaculizar el paso de fluido por una tubería, de forma que se produzca una caída en la presión del fluido, siendo el caudal proporcional a esta caída de presión” (Novo).

Entre los sensores de presión diferencial más importantes se tiene:

- Placa de Orificio
- Tobera
- Tubo Venturi
- Tubo Pitot
- Tubo Annubar

2.6.2.2. CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

Estos sensores se basan en la ley de Faraday. “La ley de Faraday dice que la tensión inducida a través de cualquier inductor que se mueve

perpendicularmente a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor” (Novo).

2.6.2.3. CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

Son sensores volumétricos que requieren partículas o burbujas en el flujo. Son ideales para aplicaciones de aguas residuales o cualquier líquido sucio que sea conductivo o a base de agua. También son ideales para aplicaciones en las que se requiere una baja caída de presión, compatibilidad química y bajo mantenimiento.

El principio de funcionamiento básico emplea el cambio de frecuencia de una señal ultrasónica cuando la reflejan partículas suspendidas o burbujas de gas en movimiento

2.7. TEMPERATURA

2.7.1. DEFINICIÓN DE TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud física que indica la cantidad de calor de un cuerpo. Está relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, específicamente con la energía cinética, la cual se asocia a los movimientos de las partículas del sistema.

2.7.2. SENSORES DE TEMPERATURA

Los sensores de temperatura son aquellos que transforman los cambios de temperatura a señales eléctricas. Hay tres tipos de sensores de temperatura, los termistores, los RTD y los termopares.

2.7.2.1. TERMISTORES

Los termistores son sensores que se basan en el comportamiento de la resistencia de los semiconductores en función de la temperatura. Hay dos tipos de termistores, los NTC, los cuales al aumentar la temperatura disminuye la resistencia y los PTC, los cuales al aumentar la temperatura aumenta la resistencia. Los termistores no son lineales según la temperatura, por lo que toca

aplicar fórmulas complejas para determinar la temperatura que requiere ser medida.

2.7.2.2. RTD

Las siglas RTD significan Resistance Temperature Detector. Los sensores RTD se basan en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Los metales empleados normalmente para la fabricación de los sensores RTD son platino, cobre, níquel y molibdeno, de los cuales los sensores de platino son los más usados debido a ser más precisos.

2.7.2.3. TERMOPAR

Son sensores compuestos por dos metales y su principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico. Un material termoeléctrico permite transformar directamente el calor en electricidad, o generar frío cuando se aplica corriente eléctrica. Los sensores termopares generan una tensión que está en función de la temperatura, por lo tanto, al medir el voltaje se puede conocer la temperatura.

2.8. SISTEMA DE CONTROL

2.8.1. SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

El sistema de control en lazo abierta se caracteriza en que la salida no afecta la acción de control, es decir, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. (Ogata, 2010)

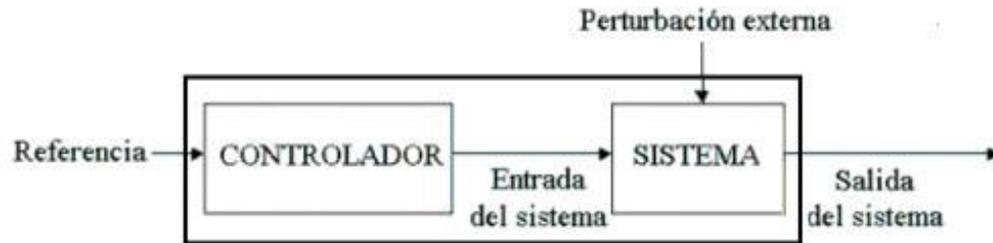


Figura 17 Sistema de control en lazo abierto

Fuente: (Acebes, 2012)

2.8.2. SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Los sistemas de control en lazo cerrado también se denominan sistemas de control realimentados.

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 señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. (Ogata, 2010)

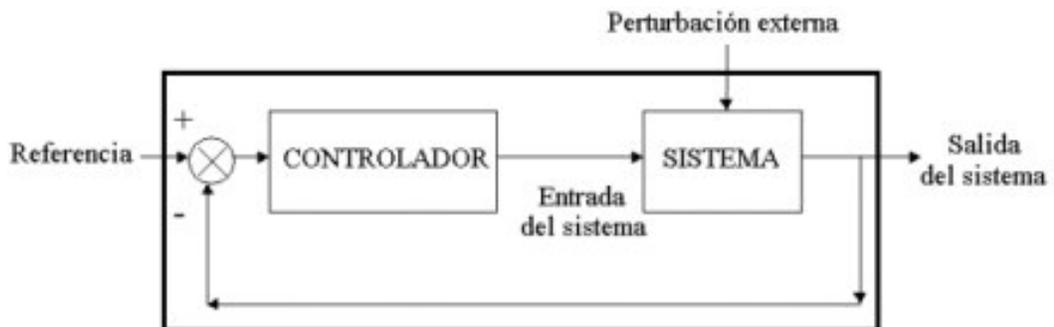


Figura 18 Sistema de control en lazo cerrado

Fuente: (Acebes, 2012)

2.8.3. CONTROL PID

Existen varios métodos para sintonizar controladores PID. Entre los principales se tiene los métodos clásicos de ajuste de Ziegler and Nichols, el cual propone dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el

Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón. También se tiene el método de sintonización usando el software MATLAB.

2.8.3.1. MÉTODO DE OSCILACIÓN

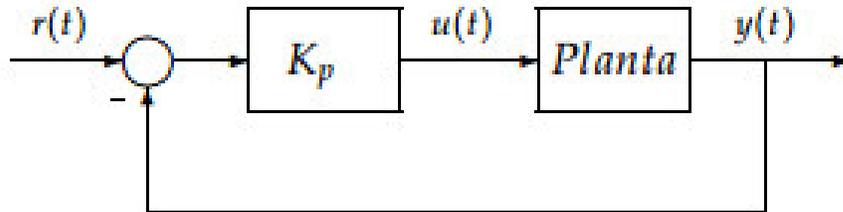


Figura 19 Lazo cerrado con ganancia proporcional

Fuente: (NEWCASTLE, 2016)

El método de oscilación se utiliza únicamente en plantas que son estables en lazo abierto. Este método consta de los siguientes pasos:

1. Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar.
2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación de la salida del controlador, P_c .
3. Ajustar los parámetros del controlador según la siguiente tabla.

Tabla 1
Parámetros de ajuste método de oscilación

	k_p	T_i	T_d
P	$0.5K_c$		
PI	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	
PID	$0.6K_c$	$0.5P_c$	P_c/g

2.8.3.2. MÉTODO BASADO EN LA CURVA REACCIÓN

Los pasos que se siguen para sintonizar el controlador PID mediante el método basado en la curva de reacción es el siguiente.

1. Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Supongamos que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
2. En el instante inicial t_0 , aplicar un cambio en la entrada escalon, desde u_0 a u_∞ .
3. Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación y ajustar los parámetros del controlador de acuerdo a la tabla.

Tabla 2
Parámetros de ajuste método curva reacción

	kp	Ti	Td
P	V_0/K_0T_0		
PI	$0.9V_0/K_0T_0$	$3T_0$	
PID	$1.2V_0/K_0T_0$	$2T_0$	$0.5T_0$

2.8.3.3. MÉTODO USANDO SOFTWARE

Para sintonizar las ganancias del controlador PID con el uso del software matemático MATLAB y la herramienta PIDTOOL se realiza los siguientes pasos.

1. En el workspace escribir el comando PIDTOOL.
2. En la pestaña Plant importar la planta a la cual se quiere controlar y en Type seleccionar el tipo de controlador.
3. Variar los parámetros Response Time (seconds) y Transient Behavior, hasta obtener el comportamiento que se desea.
4. En la pestaña Show Parameters se puede verificar los parámetros de control, el rendimiento y robustez.

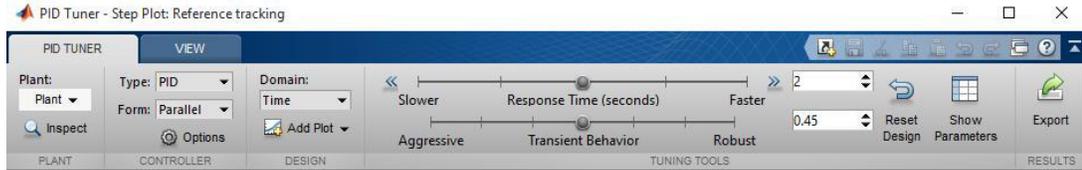


Figura 20 Sección de configuración PIDTOOL

2.9. CONTROL FUZZY

Para sintonizar las ganancias del controlador PID con el uso del software matemático MATLAB y la herramienta FUZZY se realiza los siguientes pasos.

5. En el workspace escribir el comando FUZZY.
6. En la pestaña Edit opción Add Variable, ingresar todas las entradas y salidas del sistema.
7. Configurar el nombre y rangos de cada variable.
8. En la pestaña Rule Editor programar las reglas de acuerdo a las necesidades del sistema.

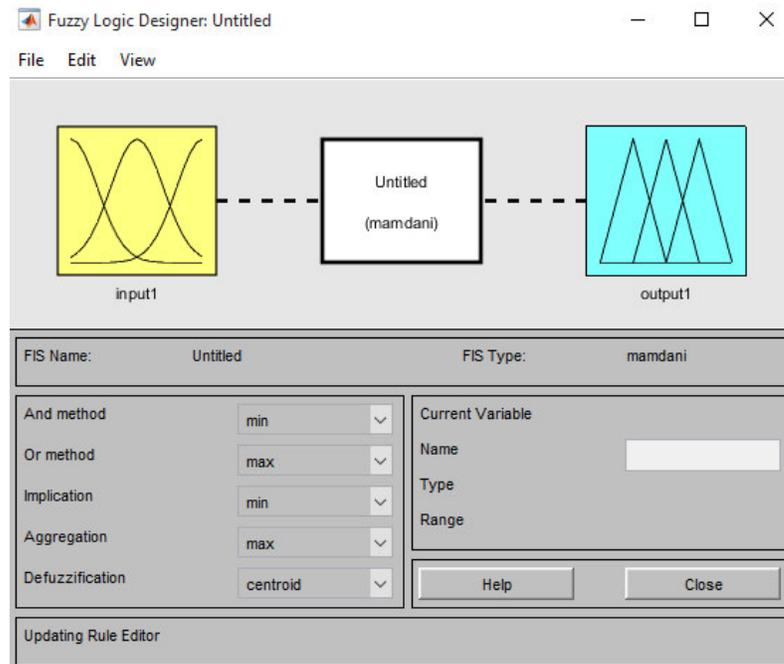


Figura 21 Interfaz programación controlador FUZZY

2.10. PLC

El PLC es un dispositivo electrónico que se utiliza en la industria para resolver problemas de secuencias en la maquinaria o procesos, ahorrando costos en mantenimiento y aumentando la confiabilidad de los equipos. La programación del PLC en la actualidad es sencilla, ya que se han ido desarrollando diferentes lenguajes de programación para facilitar al usuario la programación del mismo.

En la actualidad el campo de aplicación de un PLC es muy extenso. Se utilizan principalmente en procesos industriales de cualquier tipo y ofrecen conexión a red; esto te permite tener comunicado un PLC con una PC y otros dispositivos al mismo tiempo, permitiendo hacer monitoreo, estadísticas y reportes.

Entre las funciones del PLC están la detección de señales del proceso, la elaboración y envío de acciones al sistema, generar reportes y permite modificar la programación.

2.11. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y PROCESO

El modular didáctico para control de nivel, caudal y temperatura consta de dos tanques, el primer tanque cumple con la función de reservorio de fluido, en este caso agua, y el segundo tanque cumple con la función de almacenar el fluido depositado. Cuenta con dos bombas, dos electroválvulas y una niquelina, que son los actuadores del sistema, la bomba 1 es la encargada de llevar al líquido del reservorio al depósito, mientras que la bomba 2 se encarga del proceso opuesto, es decir, llevar al líquido del depósito al reservorio. La niquelina eléctrica tiene la función de calentar el agua y está instalada en el reservorio. También posee tres sensores, el sensor de caudal ubicado en las tuberías de la bomba 1, el sensor de nivel ubicado en el depósito y en sensor de temperatura ubicado en el reservorio. Además, posee dos llaves manuales de desfogue de líquido ubicadas en el reservorio y el depósito respectivamente.

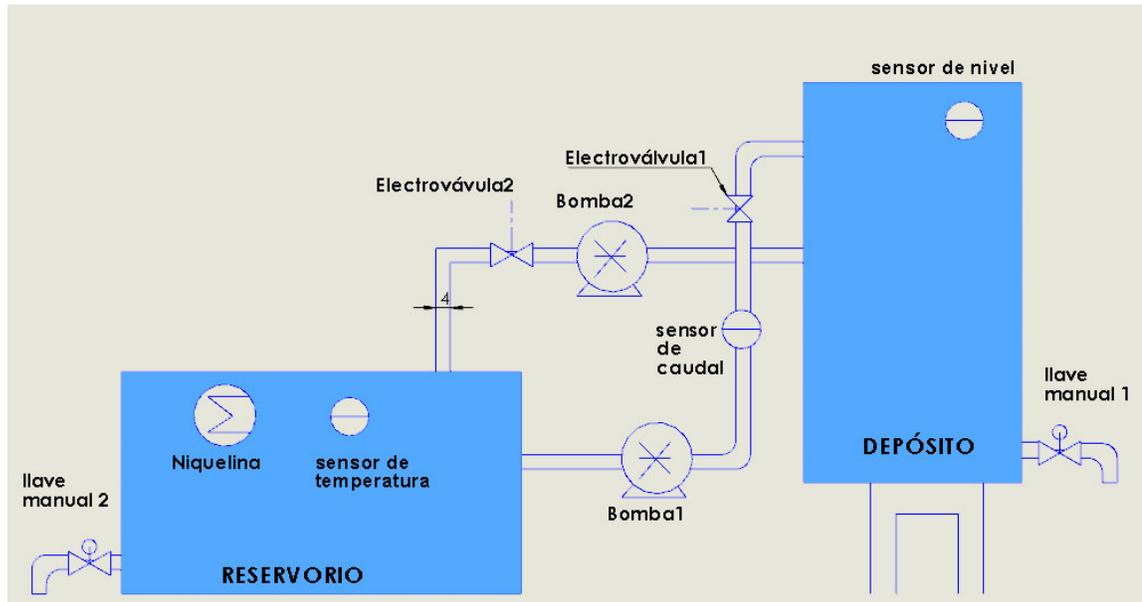


Figura 22 Modular didáctico - Sistema

En cuanto al proceso, se pretende simular un proceso industrial en ambiente real. En el modular didáctico se puede controlar tres variables como son nivel, caudal y temperatura, a partir de esto se realiza el control de las variables indicadas. Por ejemplo, se puede realizar el seteo de la temperatura a la cual se desea que llegue el agua disponible en el reservorio, realizar el seteo de la cantidad de agua que se requiere que circule por las tuberías, es decir, el caudal, o realizar el seteo del volumen al cual se desea que llegue el agua en el depósito.

El control se puede realizar utilizando diferentes técnicas de control, dependiendo del nivel de conocimiento del estudiante, sin embargo, para fines demostrativos se utilizó utilizando dos controladores, PID y FUZZY. El control de nivel se realiza mediante un control PID, mientras que el control de temperatura y caudal se realiza utilizando dos controladores FUZZY. El proceso empleado para el control de estas tres variables se representa en los siguientes diagramas.

Control de Nivel

Flujo de Fuerza o Energía

Flujo de Señales o Datos

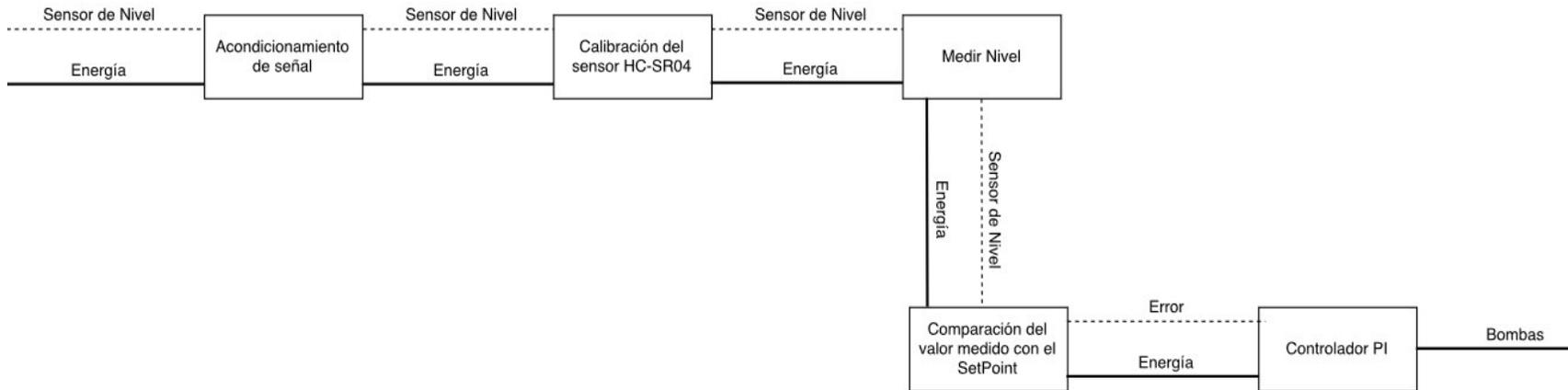


Figura 23 Diagrama-proceso de control de nivel

Control de Caudal

Flujo de Fuerza o Energía

Flujo de Señales o Datos

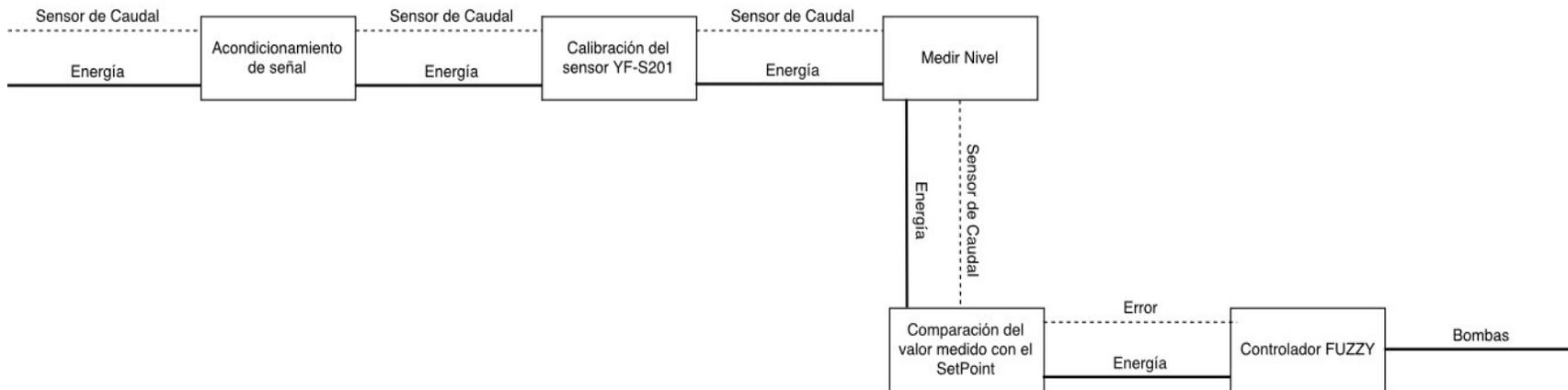


Figura 24 Diagrama-proceso de control de caudal

Control de Temperatura

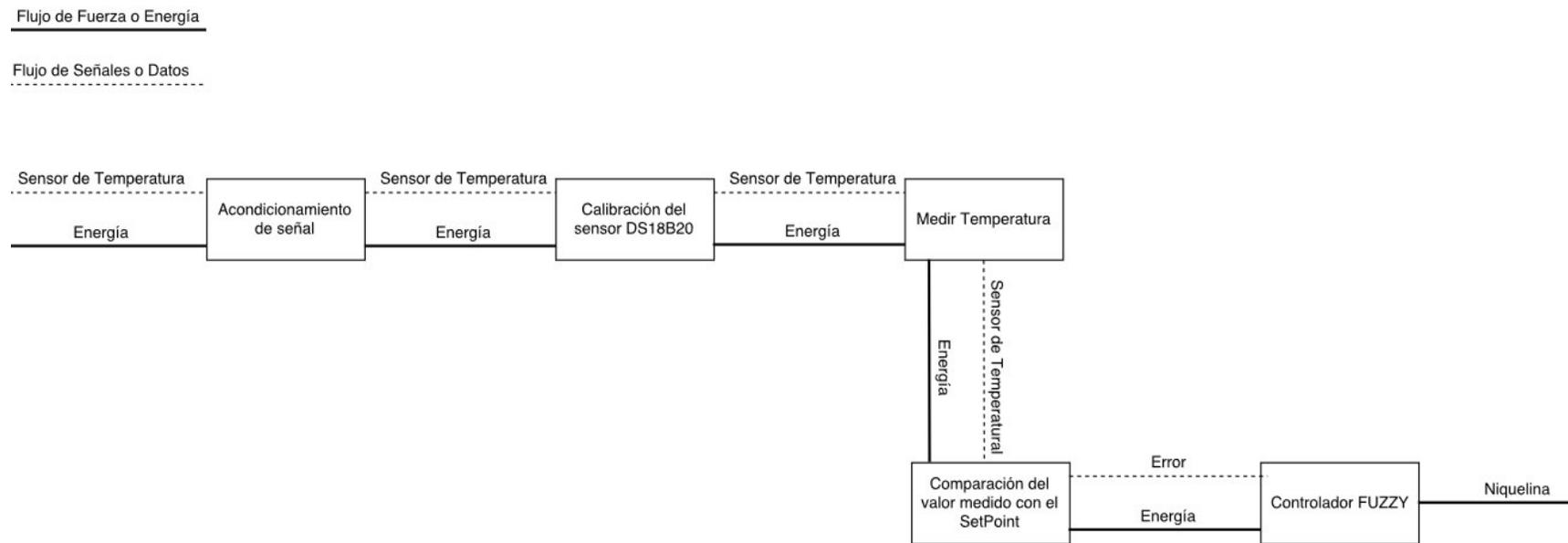


Figura 25 Diagrama-proceso de control de temperatura

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y SELECCIÓN

3.1. CRITERIO DE DISEÑO

El equipo se diseñará de acuerdo a los requerimientos del laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Los cuales se enuncian a continuación:

- El equipo será de uso didáctico y simulará un proceso industrial a pequeña escala, el cual contará con todos los implementos necesarios para el desarrollo de prácticas de laboratorio.
- El módulo debe tener un panel de control donde se pueda conectar los sensores y actuadores que intervienen en el proceso. La función que cumple, modelo y voltaje de trabajo de los sensores y actuadores estarán detallados en el panel de control.
- Se dispondrá de una tarjeta de adquisición de datos para que el estudiante pueda realizar la programación de acuerdo a los requerimientos del instructor a cargo.
- Se contará con fuentes de voltaje de 5 VDC, 12 VDC y 24 VDC para el uso de las mismas en el desarrollo de las prácticas. Además de un tomacorriente de 110 VAC para conectar los actuadores que se requieran para las prácticas de laboratorio.
- Se tendrá un panel con circuitos de acondicionamiento para el correcto funcionamiento de los diferentes sensores y actuadores disponibles en la máquina. En el panel de circuitos de acondicionamiento se detallará el nombre, modelo, y voltaje de operación.
- Se incentivará al uso de nuevas tecnologías, así como el uso de software libre.

- El módulo debe ser de fácil manejo y entendimiento para los estudiantes que hagan uso del mismo.

A continuación, se describirá es estado en el que se encontraba el equipo, el diseño y selección de cada uno los elementos que intervienen en el funcionamiento del módulo didáctico, donde se indicará parámetros, descripciones, características técnicas, entre otros aspectos.

3.2. INSPECCIÓN GENERAL DEL EQUIPO EXISTENTE

3.2.1. ESTADO INICIAL DEL EQUIPO

Inicialmente el quipo presentaba problemas tanto en su parte mecánica como en la parte electrónica, estos problemas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3
Resumen inspección equipo

INSPECCIÓN DEL EQUIPO	
TANQUES Y TUBERÍAS	
<ul style="list-style-type: none"> • Presentaba fugas de líquido. • No tenía un sistema que permita evacuar el líquido para realizar mantenimiento del reservorio y del depósito. • El tanque de depósito no contaba con numeración que permita determinar el nivel de líquido, ya sea en altura o volumen. 	
SENSORES	
SENSOR DE NIVEL (ULTRASÓNICO HC-SR04)	
<ul style="list-style-type: none"> • No funcionaba. 	
SENSOR DE TEMPERATURA (PT100)	
<ul style="list-style-type: none"> • No funcionaba. 	
SENSOR DE CAUDAL (FT-330)	
<ul style="list-style-type: none"> • No funcionaba. 	CONTINUA.

INSPECCIÓN DEL EQUIPO	
ACTUADORES	
NIQUELINA	
<ul style="list-style-type: none"> • Quemada. • Rota. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Arduino Mega 2560 dañado, no permitía la comunicación con el computador. 	
PANELES DE CONTROL	
<ul style="list-style-type: none"> • El cableado de la caja de control se encontraba incompleto y sin ningún tipo de señalización. • EL equipo no disponía de un panel de control funcional. 	

A continuación, se detalla e indica a través de imágenes el estado en el cual se encontraba el equipo inicialmente.

3.2.1.1. DIAGNÓSTICO DEL BASTIDOR

El bastidor existente en el equipo está construido principalmente por tubos cuadrados de aluminio, tiene forma de mesa de cuatro patas, sus dimensiones son 118cm de ancho, 73cm de largo y 70cm de alto, y se encuentra recubierto en su parte superior por vinil adherente transparente para evitar el filtrado de agua.

En la parte superior tiene los soportes en donde se ubican los tanques y el panel de control, mientras que en la parte posterior tiene los soportes para la caja de control.



Figura 26 Bastidor – Estado Inicial



Figura 27 Bastidor - Estado inicial

Se determinó que el bastidor se encuentra en buenas condiciones y que se le puede volver a utilizar en la reconstrucción del modular didáctico, pero requiere la sustitución del vinil transparente debido a que este se encuentra en malas condiciones y ocasiona filtración de agua.

3.2.1.2. DIAGNÓSTICO DE LA CAJA DE CONTROL

La caja de control que estaba ubicada en la parte posterior del equipo almacenaba los circuitos de acondicionamiento de sensores y actuadores, también almacenaba el microcontrolador Arduino Mega 2560.



Figura 28 Caja de Control – Estado Inicial

Se determinó que la caja de control está en buenas condiciones, pero almacenaba elementos que no funcionaban, además de tener un sistema de cableado que no se podía reutilizar. Por lo tanto, no se hizo uso de la caja de control.

3.2.1.3. DIAGNÓSTICO DEL PANEL DE CONTROL

El panel de control estaba hecho con un marco de aluminio que soportaba un pedazo de madera en forma rectangular. Este panel no contenía ningún elemento.



Figura 29 Panel de Mando – Estado inicial

El panel de mando no se encontraba en condiciones para ser reconstruido ni reutilizado.

3.2.1.4. DIAGNÓSTICO DE LOS TANQUES DE AGUA

Los tanques de agua disponibles en el equipo son hechos de acrílico transparente de 4mm de espesor, al realizar el análisis del estado de los mismos se observó que los tanques presentan fugas de agua, además de no poseer un sistema que permita la evacuación de líquido para poder realizar mantenimiento, motivo por el cual se determina que se debe volver a diseñar los tanques, tanto el reservorio como el depósito.

3.2.1.5. DIAGNÓSTICO DE LAS TUBERIAS

Al revisar el sistema de tuberías existente en el equipo se determinó que la tubería utilizada es de PVC de ½" en sus diferentes presentaciones. Se observó que en diferentes conexiones existe fuga de líquido. También se pudo observar que las tuberías están mal distribuidas para la conexión entre un tanque y otro, ocasionando de esta manera daños en las bombas, por lo cual se requiere de un rediseño de la tubería para poder conectar adecuadamente los tanques y además realizar un mantenimiento en las diferentes conexiones para eliminar cualquier fuga de líquido.

3.2.1.6. DIAGNÓSTICO DE ACTUADORES

3.2.1.6.1. ELECTROVÁLVULAS

Las electroválvulas disponibles en el equipo son de la marca AIRTAC pertenecientes al modelo 2V025-08, es una válvula selenoide 2/2 de acción directa, que se activa con una señal eléctrica de 24 VDC y dispone de un rango de trabajo de 0-0.8 MPa de presión, en total se utilizan dos electroválvulas, una para llenar el depósito de líquido y otra para vaciarlo.



Figura 30 Electroválvula AIRTAC

Para conocer las características y datos técnicos de las electroválvulas se revisó el catálogo de AIRTAC.

Tabla 4
Características electroválvula

CARACTERÍSTICAS	
•	Cuerpo plástico.
•	Acción directa.
•	Normalmente cerradas.
•	Regreso resorte.
•	Libres de mantenimiento.
•	Bobina con cables.

Fuente: (Airtac, s.f.)

Technical data:		
Operating voltage:	230 V AC	24 V DC
Operating current:	20 mA	125 mA
Screw thread:		G 1/8"
Hose fitting:		6 mm
Working pressure:		0 bar - 8 bar
Max. permissible pressure:		12 bar
Permissible fluids:	Luft, Wasser, Öl / air, water, oil	
Working temperature:	-5 °C - 80 °C	
Temperature rise coil:	45 °C	
Orifice:	∅ 2,5 mm	
Weight incl. packaging:	255 g	

Figura 31 Datos técnicos electroválvulas

Fuente:(Airtac, s.f.)

Al analizar las características de las electroválvulas presentadas por el catálogo del fabricante y al observarlas en funcionamiento, se pudo determinar que las electroválvulas se encuentran en buenas condiciones, pero el cableado presentaba pequeñas roturas que hacían que la energía eléctrica no llegue adecuadamente, por lo cual requerían de un cambio de cableado.

Por lo cual una vez realizado el cambio de cableado se usará las mismas electroválvulas para la reconstrucción del modular didáctico con el fin de poder controlar el flujo de líquido tanto para llevarlo del reservorio al depósito y viceversa.

3.2.1.6.2. BOMBAS DE AGUA

Las bombas de agua disponibles en el equipo son de la marca SHURFLO de la serie 370361, la cuales se activan con una señal eléctrica de 12 VDC y una corriente máxima de 7.5A, tiene una capacidad de transporte de 11.3 litros por minuto y soportar una presión máxima de 55 PSI, en total existen dos bombas de agua en el sistema, una para llevar el agua al depósito y la otra para vaciarlo.



Figura 32 Bomba de Agua

<u>PUMP:</u>	
Type:	4 Chamber Diaphragm pump
Ports:	1/2"-14 NPSM-Male.
Liquid:	130 °F [54 °C] Max
Dry-Prime:	6 feet [1.82 M]
Inlet PSI:	30 PSI [2.1 Bar] Max
Run Dry:	Yes
<u>ELECTRICAL:</u>	
Motor:	12VDC Permanent Magnet, Intermittent Duty
Protection:	Thermal Overload, Automatic Restart
Leads:	16 AWG, 10" [25 cm] Red +, 13" [33 cm] Black -
Fuse:	10 Amp Recommended
Control:	Shut-Off 55 PSI [3.8 Bar] Restart 40 PSI [2.8 Bar]

Figura 33 Bomba de Agua

Fuente: (SHURFLO, 2011)

Al revisar el estado de las bombas se observó que funcionaban correctamente, pero una de las mismas presentaba una rotura en uno de sus tomas de agua, por lo cual requería de reparación para poder funcionar adecuadamente.

Por lo cual una vez realizada la reparación de la bomba se procederá a utilizar las mismas bombas para la reconstrucción del modular didáctico con el propósito de utilizarlas para poder llevar el líquido del reservorio al depósito y viceversa.

3.2.1.6.3. NIQUELINA

La niquelina disponible en el equipo para calentar agua funcionaba con una señal eléctrica de 110V AC, la cual al inspeccionarla se encontraba quemada y presentaba una rotura en su base, motivo por el cual la misma no era ya funcional ni reparable.

Por lo cual requiere la selección y sustitución de la misma para poder realizar el calentamiento del líquido del reservorio.

3.2.1.7. DIAGNÓSTICO DE SENSORES

3.2.1.7.1. SENSOR DE NIVEL

El sensor de nivel disponible en el equipo es el ultrasónico HC-SR04 el cual al momento de realizar pruebas de funcionamiento se determinó que estaba dañado, motivo por el cual se requiere seleccionar un nuevo sensor.

3.2.1.7.2. SENSOR DE CAUDAL

El sensor de caudal disponible en el equipo es el FT330 capaz de trabajar en un rango de 0.2 a 4 GPM y una señal eléctrica de 5 a 24V DC. Al realizar pruebas de funcionamiento se observó que no operaba y que no podía ser utilizado para la medición de caudal. Por lo cual se utilizará otro sensor en la reconstrucción del modular didáctico.

3.2.1.8. SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura disponible en el equipo es el PT100 de tres hilos el cual al realizar una examinación del mismo se observó que se encontraba roto y que no existía la manera de poder repararlo. Motivo por lo cual se requiere de la selección y sustitución del mismo para la medición de la temperatura del reservorio de líquido.

Al analizar las características del sensor de temperatura PT100 se encontró que estos sensores son usados en ambientes industriales, y que para su funcionamiento requieren de un circuito de acondicionamiento complejo, o un módulo de alto costo. Por este motivo, se seleccionará un nuevo sensor.

3.3. SISTEMA MECÁNICO

3.3.1. DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN

El sistema de tuberías utilizado para el transporte de líquido del reservorio al depósito y viceversa, contiene elementos de instrumentación necesarios para el correcto funcionamiento del proceso.

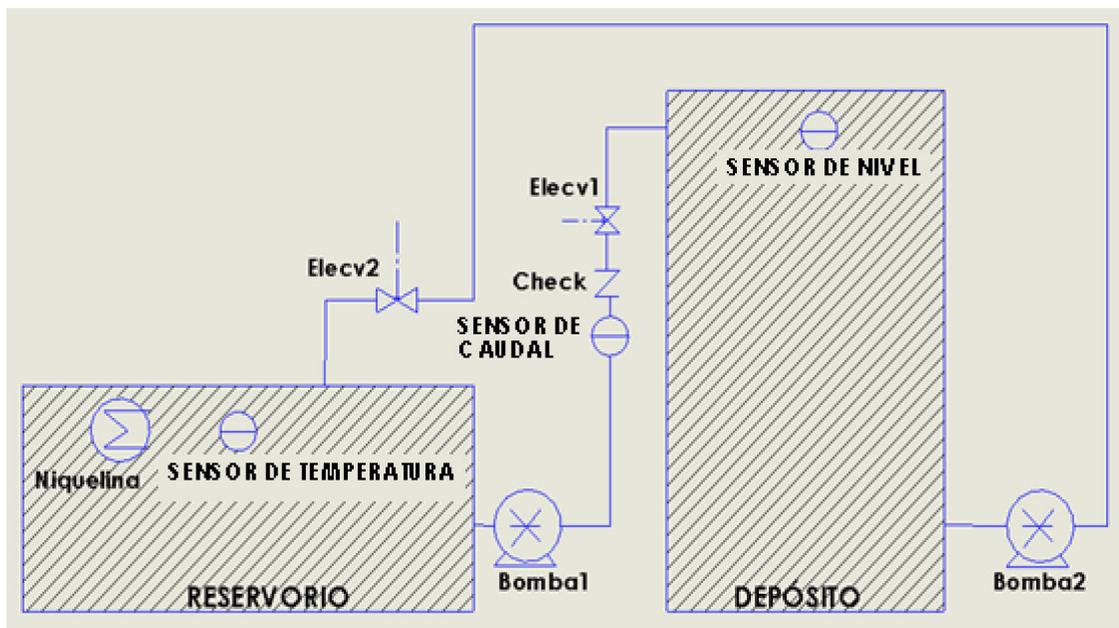


Figura 34 Diagrama General de Actuadores y Sensores

En el diagrama se muestra en qué lugar se encuentran ubicados los sensores de nivel, caudal y temperatura, además de mostrar el lugar donde están los actuadores tales como: bomba 1, bomba 2, niquelina y válvulas de paso.

3.3.1.1. TUBERÍA DEL SISTEMA

La tubería seleccionada para desplazamiento de líquido de un depósito a otro es la tubería de PVC con un diámetro $\frac{1}{2}$ " en sus distintas presentaciones.

Se selecciona esta tubería debido a que es capaz de soportar el flujo de líquido que circulará por las misma además de su fácil adquisición, manipulación y bajo costo. Los accesorios que utiliza el equipo son los siguientes.

- Codo de 90°
- Unión Universal
- Unión Sencilla
- Neplos

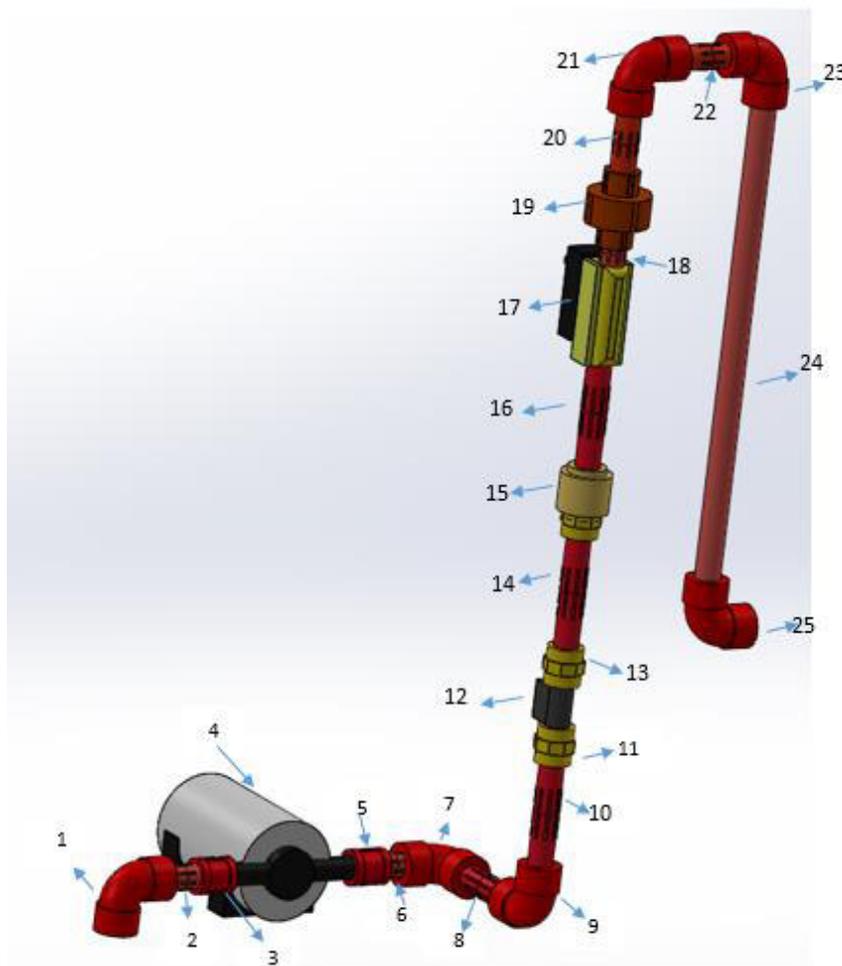


Figura 35 Rediseño tubería del reservorio al depósito

Tabla 5
Distribución de elementos del reservorio al depósito

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS	
1	Codo de 90°
2	Neplo de 3cm
3	Unión Simple
4	Bomba 1
5	Unión Simple
6	Neplo de 3cm
7	Codo de 90°
8	Neplo de 5cm
9	Codo de 90°
10	Neplo de 10cm
11	Unión Simple de cobre
12	Sensor de caudal
13	Unión Simple de cobre
14	Neplo de 10cm
15	Check
16	Neplo de 10cm
17	Electroválvula 1
18	Neplo de 3cm
19	Unión Universal
20	Neplo de 5cm
21	Codo de 90°
22	Neplo de 5cm
23	Codo de 90°
24	Tubo de 30 cm
25	Codo de 90°

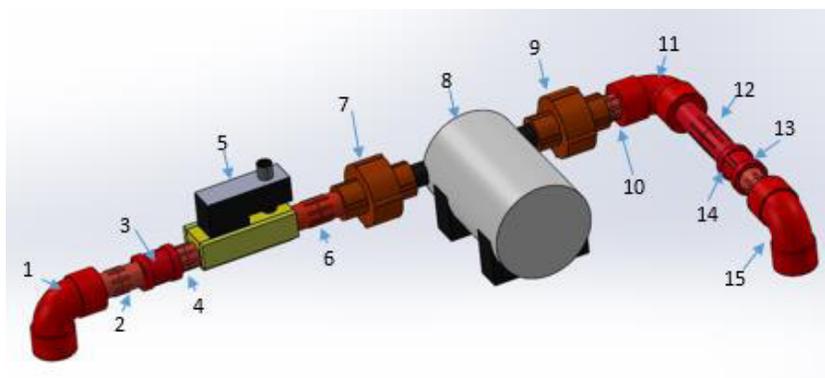


Figura 36 Rediseño tubería del depósito al reservorio

Tabla 6
Distribución de elementos del depósito al reservorio

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS	
1	Codo de 90°
2	Neplo de 5cm
3	Unión Simple
4	Neplo de 3cm
5	Electroválvula 2
6	Neplo de 5cm
7	Universal
8	Bomba 2
9	Universal
10	Neplo de 3cm
11	Codo de 90°
12	Neplo de 6cm
13	Unión Simple
14	Neplo de 3cm
15	Codo de 90°

A continuación, se detalla cómo están distribuidos los elementos: Para el transporte de líquido del reservorio al depósito, el sistema de tubería empieza con un codo de 90°, de este elemento se absorberá el agua, posteriormente a través de una unión sencilla y un neplo se conecta a la bomba 1 la cual está ubicada en la parte lateral derecha del reservorio, luego se realiza una conexión con un codo de 90°, un neplo y otro codo de 90° para direccionar la tubería hacia arriba, en esta parte se conectan a través de neplos y uniones sencillas el sensor de caudal, una válvula check, la electroválvula 1 y una unión universal; finalmente a través de un codo de 90°, una unión sencilla y otro codo de 90° se transporta el líquido al otro tanque por la parte lateral izquierda del mismo.

Para el transporte de líquido del depósito al reservorio, el sistema de tubería empieza con un codo de 90° el cual absorbe el líquido del depósito, esto está ubicado en la cara posterior del tanque, pasa a través de una unión sencilla y un neplo conector con la bomba 2, a través de un neplo se conecta a una unión universal, la misma que conecta a través de un neplo con la electroválvula 2,

llegando a la parte posterior del reservorio a través de la conexión de una unión simple, un niple y un codo de 90°, transportando así el líquido al reservorio.

3.3.2. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LÍQUIDO

El sistema requiere que los tanques que almacenaran el líquido sean transparentes, es decir se puede visualizar el transporte de líquido de un tanque a otro debido a su propósito de ser un módulo didáctico. Además, se requiere que sean capaces de soportar la presión del fluido y las variaciones de temperatura en un rango de 20 °C a 60 °C.

El material seleccionado de acuerdo a nuestras necesidades es el acrílico colado debido a que posee las propiedades de ser transparente, fácil modelado, ser capaz de soportar temperaturas desde los -40 °C y entre 60 °C y 90 °C de temperatura continua, su tasa de transmisión de luz es del 92%, el módulo de elasticidad es de 27500 kg/cm² bajo la norma ASTM D-790 y una resistencia al límite elástico de 840 kg/cm² según la norma ASTM D-790.

Tabla 7
Propiedades mecánicas y ópticas del acrílico

Propiedades Mecánicas y Ópticas					
Propiedades Mecánicas					
Propiedades Mecánicas	Unidades	Normas ASTM	Colado	Extruido	Extruido Alto Impacto
Tracción					
Resistencia a la rotura	Kg/cm ²	D-790	840 - 1300	740 - 1300	
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	
Módulo de Elasticidad	Kg/cm ²	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	17.500

CONTINUA.

Resistencia en el Limite Elástico	Kg/cm²	D-790	840 - 1300	740 - 1300	562
Propiedades Mecánicas					
Propiedades Mecánicas	Unidades	Normas ASTM	Colado	Extruido	Extruido Alto Impacto
Tracción					
Resistencia a la compresión	Kg/cm²	D-790	773 - 1.330	740 - 1260	
Propiedades Ópticas					
Transmisión de luz	%	D-791	92	92	92

Fuente: (idePLAS, s.f.)

Tabla 8

Propiedades térmicas y físicas del acrílico

Propiedades Térmicas y Físicas	
Propiedades Térmicas	
Temperatura Mínima recomendada para servicio	-40 °C
Temperatura Máxima recomendada para servicio	65 °C – 90 °C
Propiedades Físicas	
<ul style="list-style-type: none"> • Larga Vida Util. • Facil limpieza. • Baja Densidad (1.2 g/cm³). • Alta resistencia al medio ambiente. 	

Fuente: (Policarbonatos, 2015)

Los reservorios de líquido utilizados en el módulo didáctico tienen forma de un prisma rectangular sin tapa, están contruidos con planchas de material acrílico de 4mm de espesor y fueron ensamblados con liquido adherente especialmente diseñado para este tipo de material (pega acrílica), posteriormente se reforzaron las esquinas de los depósitos con silicona para sellar cualquier tipo de fuga de líquido que pudiera existir.

3.3.2.1. TANQUE DE RESERVORIO DE LÍQUIDO

Las dimensiones del reservorio de líquido son de 50 cm de ancho, 50 cm de largo y 30 cm de altura. Obteniendo de esta manera capacidad volumétrica de 75 litros.

$$\text{Volúmen del reservorio} = (50\text{cm})(50\text{cm})(30\text{cm})$$

$$\text{Volúmen del reservorio} = 75000\text{cm}^3 * (1\text{lt}/1000\text{cm}^3)$$

$$\text{Volúmen del reservorio} = 75\text{lt}$$

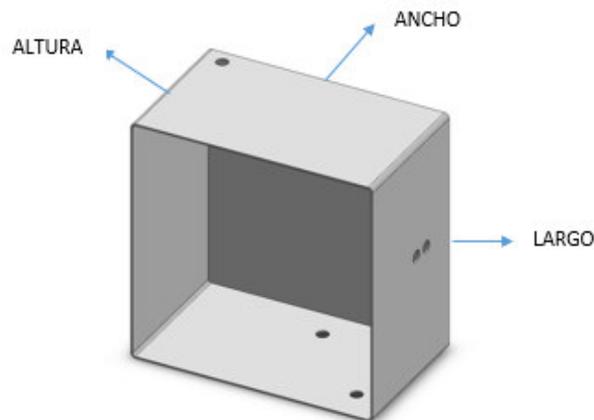


Figura 37 Reservorio

Para calcular el esfuerzo al cual estarán sometidas las paredes del tanque, se procede a calcular el peso que ejerce el líquido sobre las paredes.

Reservorio:

- Peso del agua= $\delta \cdot g \cdot h \cdot A$

Donde:

- δ : densidad del líquido (agua)
- g: gravedad
- h: altura del líquido
- A: Área del fondo

$$\text{Peso máximo del agua} = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.3 \text{ m} * (0.5 \text{ m} * 0.5 \text{ m})$$

$$\text{Peso máximo del agua} = 735.75 \text{ N}$$

Con el valor obtenido, se calcula el esfuerzo que se ejerce sobre las paredes, sabiendo que el espesor del acrílico es de 4mm.

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = \frac{\text{Peso máximo del agua}}{\text{Área transversal de la pared}}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = \frac{735.75 \text{ N}}{0.04 \text{ m} * 0.5 \text{ m}}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = 36787.5 \text{ N/m}^2$$

El límite de resistencia elástica indicada en la tabla es de 840 kg/cm² lo que equivale a 823200 N/m², por lo que el factor de seguridad obtenido es el siguiente.

$$FS = \frac{S_y}{S_{\text{admisibile}}}$$

$$FS = \frac{823200}{36787.5}$$

$$FS = 22$$

Con este resultado se concluye que el tanque de reservorio de líquido podrá operar sin problemas. Para verificar esto resultados se realizó un estudio CAD utilizando elementos finitos.

Tabla 9
Información de la malla del reservorio

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	18.4188 mm
Tolerancia	0.920942 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 10
Detalles de la malla del reservorio

Número total de nodos	30660
Número total de elementos	15138
Cociente máximo de aspecto del reservorio	23.46
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	0.661
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.562
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0

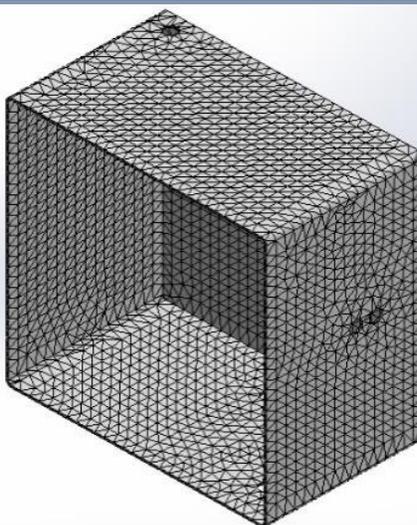


Tabla 11
Estudio de tensiones del reservorio

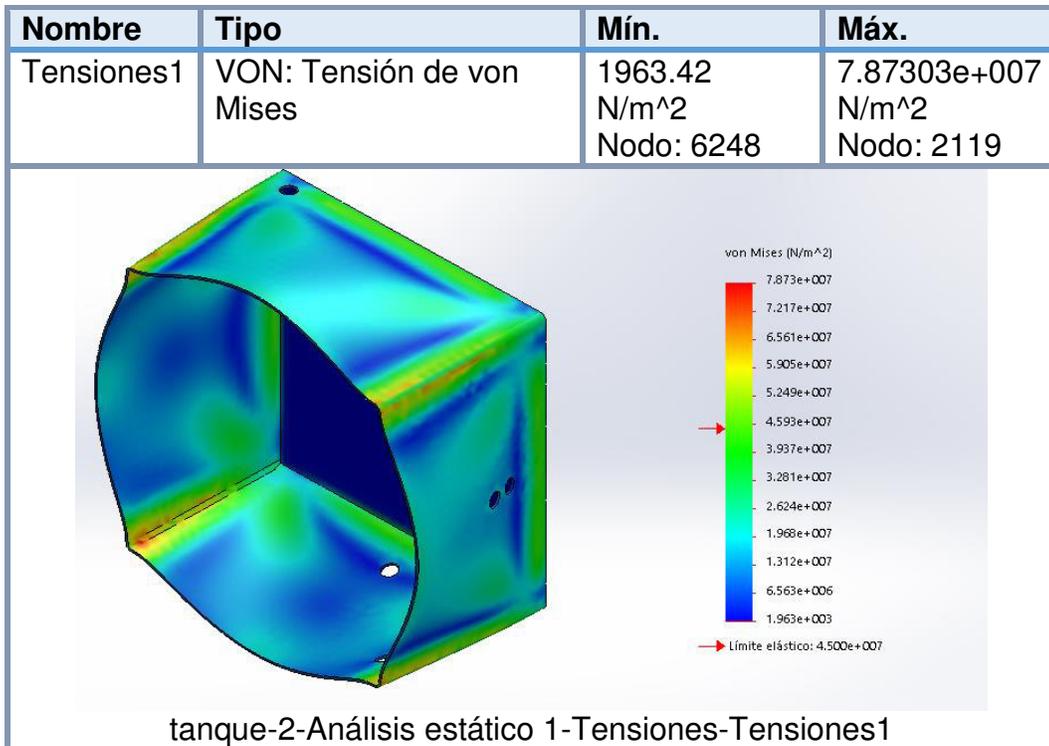


Tabla 12
Estudio de desplazamientos del reservorio

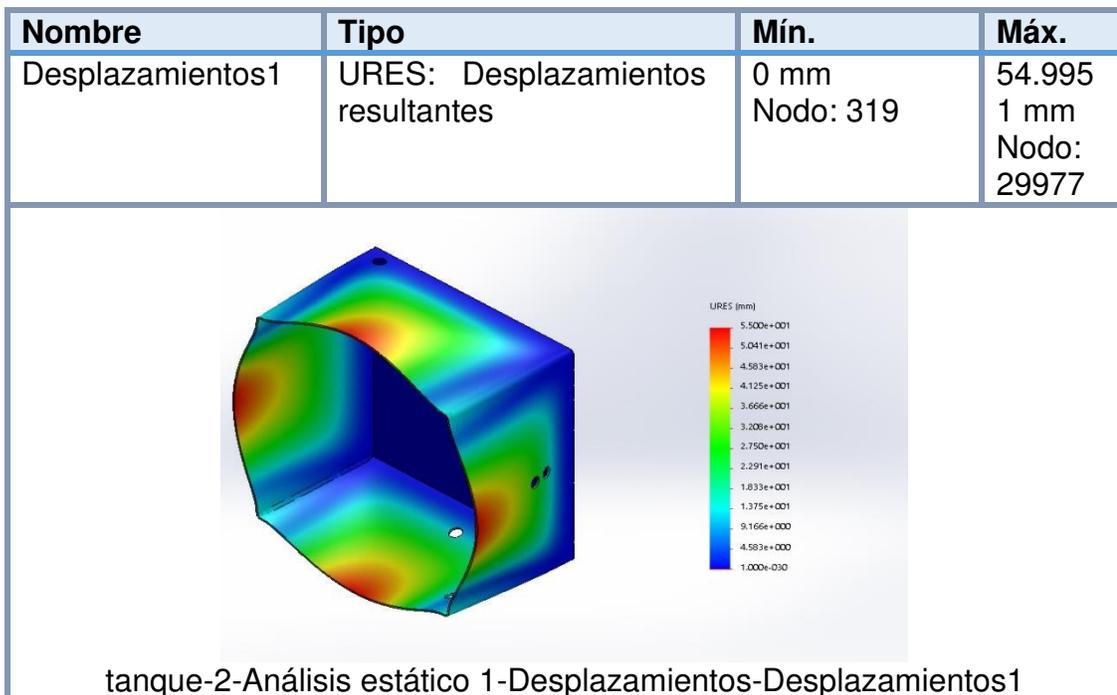
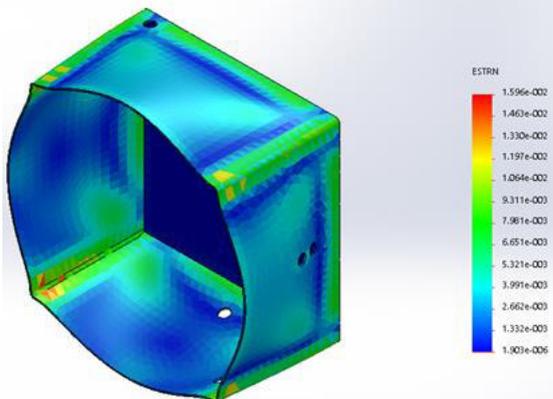


Tabla 13
Estudio de deformaciones unitarias del reservorio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.90311e-006 Elemento: 1392	0.0159601 Elemento: 12526



tanque-2-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1



Figura 38 Reservorio instalado en el módulo

3.3.2.2. DEPÓSITO DE LÍQUIDO

Las dimensiones del reservorio de líquido son de 30 cm de ancho, 30 cm de largo y 60 cm de altura. Obteniendo de esta manera capacidad volumétrica de 54 litros.

$$\text{Volúmen del reservorio} = (30\text{cm})(30\text{cm})(60\text{cm})$$

$$\text{Volúmen del reservorio} = 54000\text{cm}^3 * (1\text{lt}/1000\text{cm}^3)$$

$$\text{Volúmen del reservorio} = 54\text{lt}$$

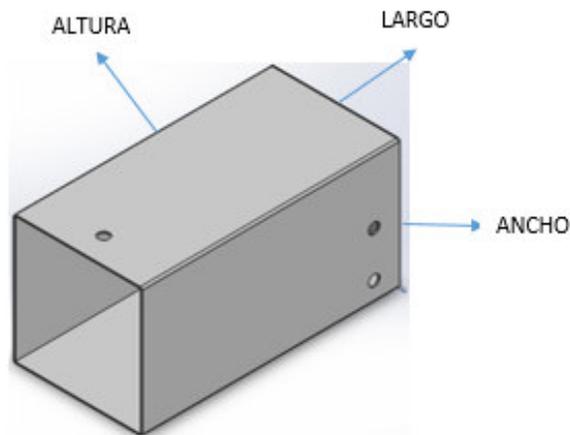


Figura 39 Deposito

Para calcular el esfuerzo al cual estarán sometidas las paredes del tanque, se procede a calcular el peso que ejerce el líquido sobre las paredes.

Reservorio:

- $\text{Peso del agua} = \delta * g * h * A$

Donde

- δ : densidad del líquido (agua)
- g : gravedad
- h : altura del líquido
- A : Área del fondo

$$\text{Peso máximo del agua} = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.6 \text{ m} * (0.3 \text{ m} * 0.3 \text{ m})$$

$$\text{Peso máximo del agua} = 529.74 \text{ N}$$

Con el valor obtenido, se calcula el esfuerzo que se ejerce sobre las paredes, sabiendo que el espesor del acrílico es de 4mm.

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = \frac{\text{Peso máximo del agua}}{\text{Área transversal de la pared}}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = \frac{529.74 \text{ N}}{0.04 \text{ m} * 0.3 \text{ m}}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en las paredes} = 44145 \text{ N/m}^2$$

El límite de resistencia elástica indicada en la tabla es de 840 kg/cm² lo que equivale a 823200 N/m², por lo que el factor de seguridad obtenido es el siguiente.

$$FS = \frac{S_y}{S_{\text{admisible}}}$$

$$FS = \frac{823200}{44145}$$

$$FS = 18.6$$

Con este resultado se concluye que el tanque de reservorio de líquido podrá operar sin problemas. Para verificar esto resultados se realizó un estudio CAD utilizando elementos finitos.

Tabla 14
Información de la malla del depósito

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	29.0045 mm

CONTINUA.

Tolerancia	1.45022 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 15
Detalles de la malla del depósito

Número total de nodos	12576
Número total de elementos	6266
Cociente máximo de aspecto	40.297
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	0.0798
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	12.6
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0

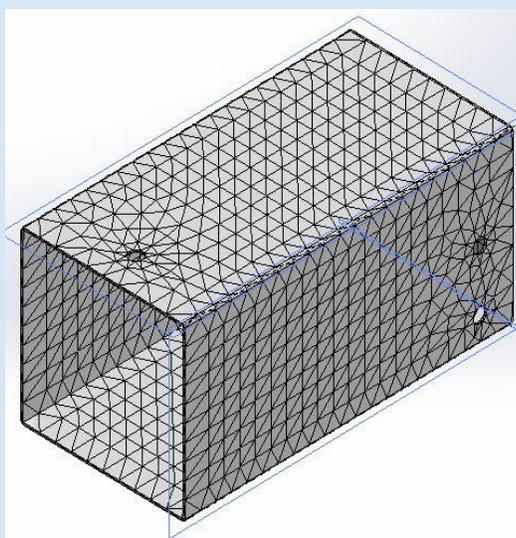


Tabla 16
Estudio de tensiones del depósito

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	8331.37 N/m ² Nodo: 2417	6.49038e+007 N/m ² Nodo: 392

CONTINUA.

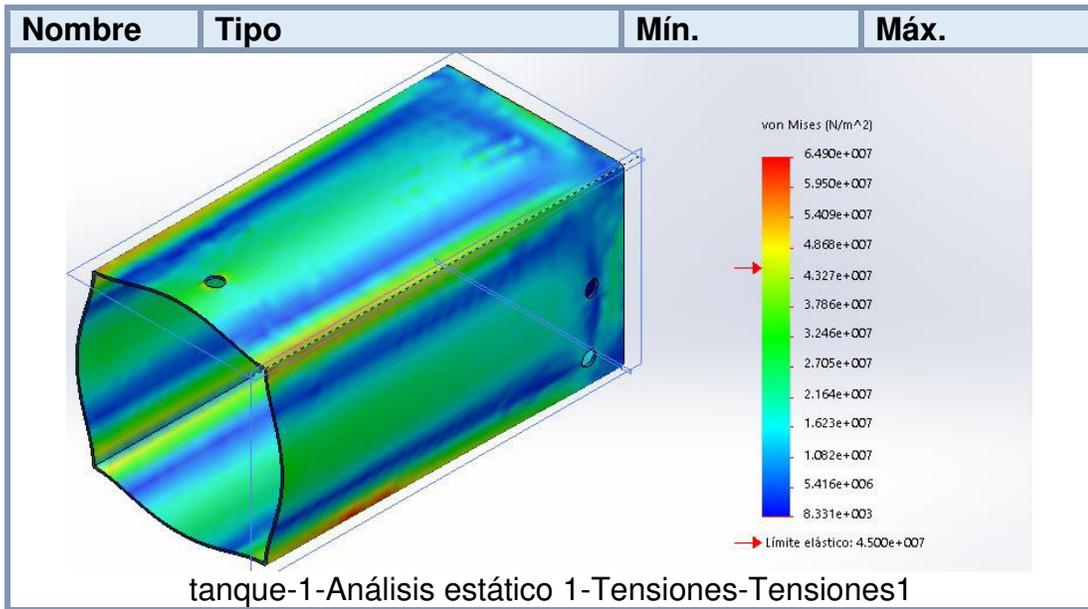


Tabla 17
Estudio de desplazamientos del depósito

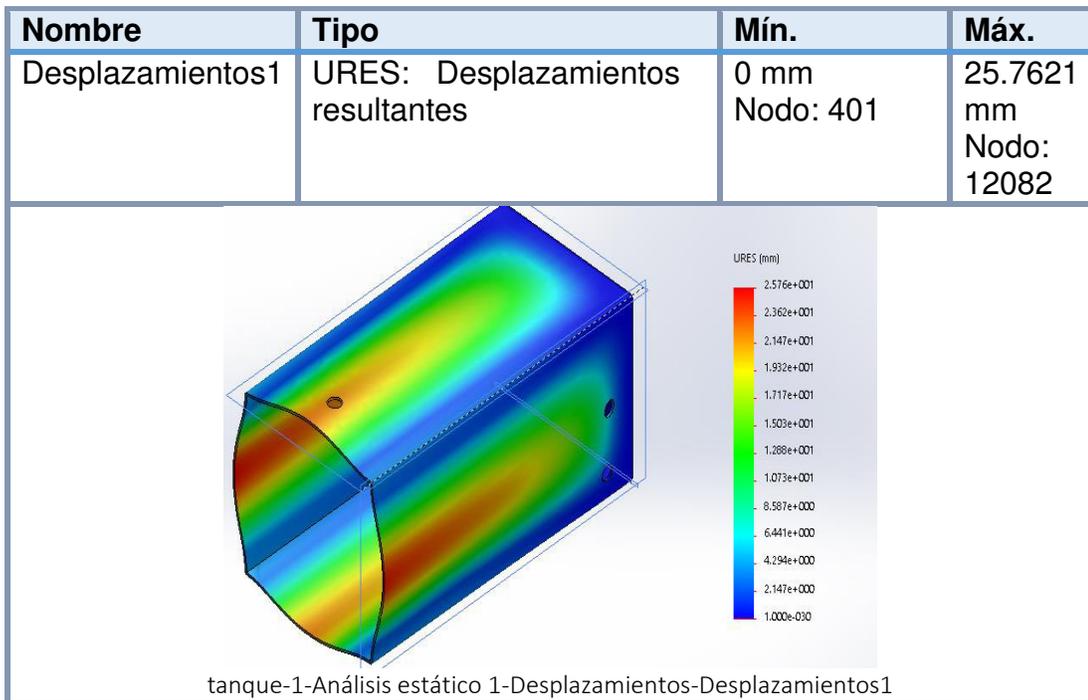
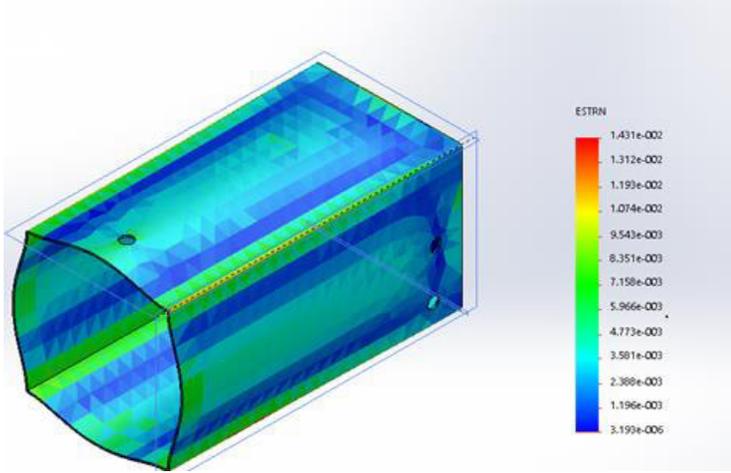


Tabla 18
Estudio de deformaciones unitarias del depósito

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.1929e-006 Elemento: 5112	0.0143134 Elemento: 4562



tanque-1-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1



Figura 40 Depósito instalado en el módulo

3.4. ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO

3.4.1. SELECCIÓN DEL SENSOR DE NIVEL

Se analizó las características del sensor ultrasónico para determinar si es el sensor adecuado para el sistema, las características son las siguientes.

Tabla 19
Características sensor HC-SR04

Sensor de Distancia Ultrasónico HC-SR04	
Voltaje de funcionamiento	5 VDC
Corriente estática	<2 mA
Trabajo actual	15 mA
Frecuencia de trabajo	40 KHz
Ángulo eficaz	<15 °
Distancia de detección	2 cm – 450 cm
Resolución	0.3 cm
Medición de ángulo	30 °
Disparo de la señal de entrada	TTL pulso 10us
Echo señal de salida	Señal PWL de TTL

Fuente: (Electronics, s.f.)

Las características del sensor ultrasónico HC-SR04 son buenas para medir distancia, tiene un buen rango, lo que permite realizar una buena medición

del nivel de agua, además la resolución es media. Por lo tanto, el nuevo sensor a adquirir va a ser el ultrasónico HC-SR04.

3.4.2. SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Para la medición de temperatura del líquido del reservorio de líquido se requiere que el sensor cumpla con los siguientes parámetros.

- Que sea sumergible.
- Rango de Trabajo de 20 °C a 60 °C.
- Voltaje de Alimentación de 5 VDC.
- Fácil uso.

Por lo cual se selecciona el sensor de temperatura DS18B20 sumergible el cual tiene un rango de trabajo de -5 °C a 125 °C, una alimentación de 5 VDC y puede operar bajo agua además de fácil instalación y uso.



Figura 41 Sensor DS18B20

Fuente: (DALLAS, 2012)

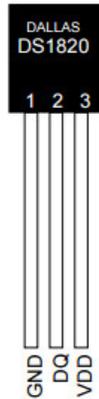


Figura 42 Distribución pines sensor DS18B20

Fuente: (DALLAS, 2012)

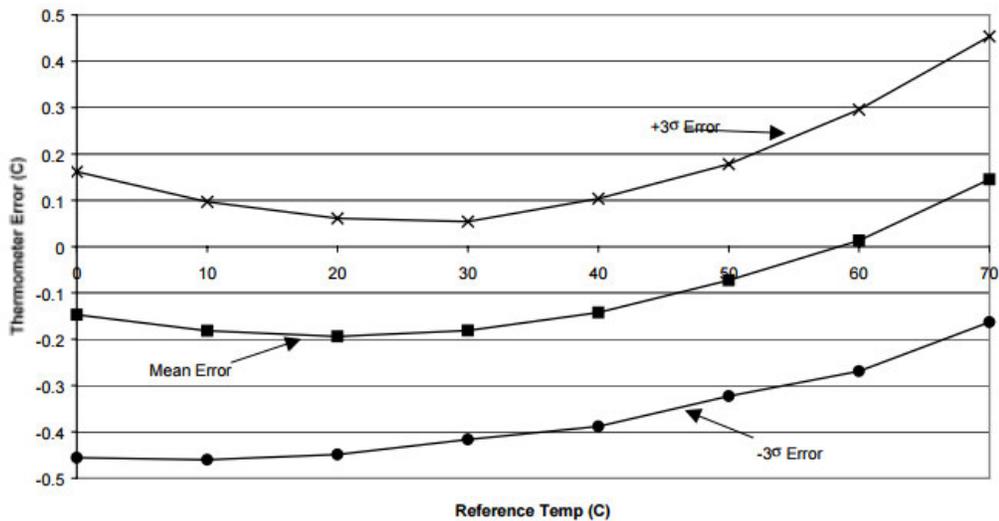


Figura 43 Curva característica sensor DS18B20

Fuente: (DALLAS, 2012)

3.4.3. SELECCIÓN DEL SENSOR DE CAUDAL

Se seleccionó el sensor de caudal YF-S201 debido a las características que posee. A continuación, se mencionan las características más importantes del sensor.

Tabla 20
Características Sensor YF-S201

Modelo	YF-S201
Tipo de Sensor	Efecto Hall
Voltaje Nominal	5 to 18V DC (Voltaje Mínimo Requerido 4.5V)
Máxima Corriente de Operación	15mA @ 5V
Voltaje de Salida	5V TTL
Velocidad de Flujo	1 a 30 Litros/Minuto
Rango de Temperatura	-25 a +80°C
Precisión	±10%
Máxima Presión de Agua	2.0 MPa
Pulsos por Litro	450
Rosca	1/2"

Fuente: (CHIPS, 2015)



Figura 44 Sensor YF-S201

Fuente: (CHIPS, 2015)

3.4.4. SELECCIÓN DE LA NIQUELINA

Se requiere una niquelina que pueda calentar el agua de manera constante y tenga la potencia suficiente para poder calentar un volumen de 75 litros de agua, que es el volumen de líquido que puede almacenar el tanque de reservorio. Además, esta niquelina debe tener su sistema de alimentación de manera que no tenga contacto con el agua.

Se selecciona una resistencia de inmersión o niquelina industrial de 110 VAC con una potencia de 4000W.



Figura 45 Niquelina

Fuente:(MIKAI, 2006)

3.4.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Para la selección del controlador se toma en cuenta el requerimiento de que éste sea programable en software libre, además de que sea fácil de utilizar y su entorno de programación no sea muy complejo.

El controlador seleccionado es el PLC MDUINO de 42 I/Os perteneciente a la empresa Industrial Shields, cuyo software de programación es el IDE de Arduino el cual es un software libre. Su voltaje de funcionamiento es de 12-24VDC y soporta una corriente máxima de 0.5A. Cuenta con 26 salidas de las cuales 12 son salidas análogas y 14 son salidas digitales, cuenta con 22 entradas de las cuales 6 son análogas y 16 son digitales, cuenta con puertos para conexión

Ethernet, USB, RS485, RS232, I2C, Mod bus. Además de contar con un reloj interno de 16MHz.



Figura 46 PLC MDUINO 42I/Os

Fuente: (Shields, 2016)

CONECTABLE PLC ARDUINO 24Vcc M-DUINO				
MODEL TYPE	21 I/Os	42 I/Os	58 I/Os	
Input Voltage	12-24Vdc			Fuse protection (1A) Polarity protection
I max.	0.5A			
Size	101x119.5x70.1	101x119.5x94.7	101x119.5x119.3	
Clock Speed	16MHz			
Flash Memory	256KB of which 8KB used by bootloader			
SRAM	8KB			
EEPROM	4KB			
Communications	I2C ¹ - Ethernet Port - USB - RS485 - RS232 - SPI - (2x) Rx,Tx (Arduino pins)			Max232-Max485-W5100
TOTAL Input points	13	26	36	
TOTAL Output points	11	22	30	
Type of signals				
An/Dig Input 10bit (0-10Vcc)	6	12	16	0-10V ¹ Input Impedance: 39K Separated PCB ground
Digital Isolated Input (24Vcc)	7	14	20	5/12/24Vdc I min: 2/6/1.2 mA Galvanic INSULATION
* Interrupt isolated Input HS (24Vcc)	2	4	6	5/12/24Vdc I min: 2/6/1.2 mA Galvanic INSULATION
Analog Output 8bit (0-10Vcc)	3	6	8	0-10 Vdc I max: 40 mA Separated PCB ground
Digital Isolated Output (24Vcc)	8	16	22	5/12/24 Vdc I max: 0.3 A Galvanic INSULATION Diode Protected for Relay
PWM Isolated Output 8bit (24Vcc)	3	6	8	5/12/24 Vdc I max: 0.3 A Galvanic INSULATION Diode Protected for Relay
Expandability	I2C - 127 elements - Serial Port RS232/RS485			
Reference	IS.MDUINO base.21	IS.MDUINO base.42	IS.MDUINO base.58	
* By using this type of signal can no longer use Digital signal (24Vdc)				
You must to read product Datasheet.				
(1) IMPORTANT. Visit accessories/communication section.				

Figura 47 Especificaciones PLC MDUINO 42I/Os

Fuente: (Shields, 2016)

3.4.6. PANEL DE CONTROL

3.4.6.1. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL DE CONTROL

Se requiere que el panel tenga pines conectores de fácil manipulación, además de funcionar adecuadamente con los voltajes y corrientes de los diferentes elementos del equipo, requiere de luces indicadores y botones de control. Adicionalmente el panel debe contar con conexión USB y Ethernet para poder realizar la comunicación con el PLC, fuentes de voltaje de 5 VDC, 12 VDC, 24 VDC y alimentación de 110 VAC.

Para la conexión de los pines del PLC se selecciona las borneras para placas de circuito impreso, ya que estas permiten la transmisión fácil y segura de las señales eléctricas, pueden soportar corrientes de hasta 232A y voltajes de hasta 1000V, cumplen con la especificación de ser de fácil uso, poder realizar la conexión entre los diferentes elementos del equipo y ahorrar espacio.



Figura 48 Bornera para PCB

Para la conexión de los actuadores y fuentes de voltaje DC se selecciona como pines de conexión jacks hembra banana de 4 mm de diámetro interior modelo JA-203, de color rojo para indicar VCC, negro para indicar GND y blanco para indicar señal en el caso de los sensores.



Figura 49 Jack Hembra

Para la luz indicadora de conexión de sensores, bombas y electroválvulas se seleccionó diodos led's jumbo de color verde de 3 VDC y 10 mm de alto, los cuales se encenderán cuando el elemento este energizado.



Figura 50 Led Jumbo

Para la alimentación de 110V se selecciona un tomacorriente doble con tierra comercial, el cual ira en el tablero para la alimentación de la niquelina.

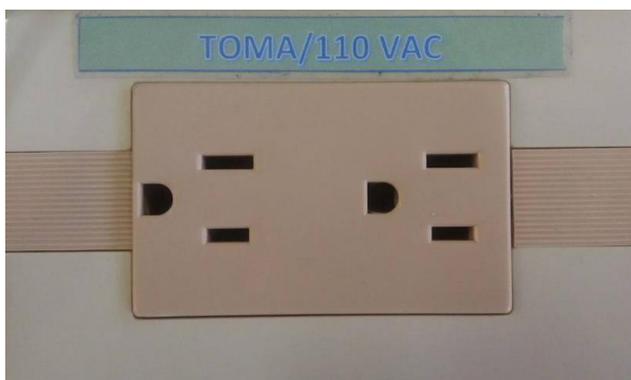


Figura 51 Tomacorriente 110 VAC

Para los botones de control de encendido se implementará un switch de doble estado para el encendido y apagado general del equipo, para el paro de emergencia se implementará un botón comercial de parada de emergencia que cortará la energía en caso de requerir hacerlo.



Figura 52 Switch de Encendido/Apagado



Figura 53 Botón hongo paro de emergencia

Para la comunicación con el PLC se implementará un conector USB macho para poder conectarle directo a la computadora y un conector ethernet hembra.



Figura 54 Cable USB

Fuente: (ELECTROPC, 2014)

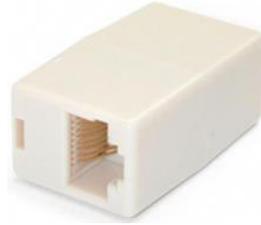


Figura 55 Caja de empalme acoplador Ethernet

Fuente (COOLMOD, 2001)

Todos los elementos anteriormente mencionados serán distribuidos en un panel de MDF de 60 cm de ancho y 15 cm de largo como se indica en las siguientes figuras.

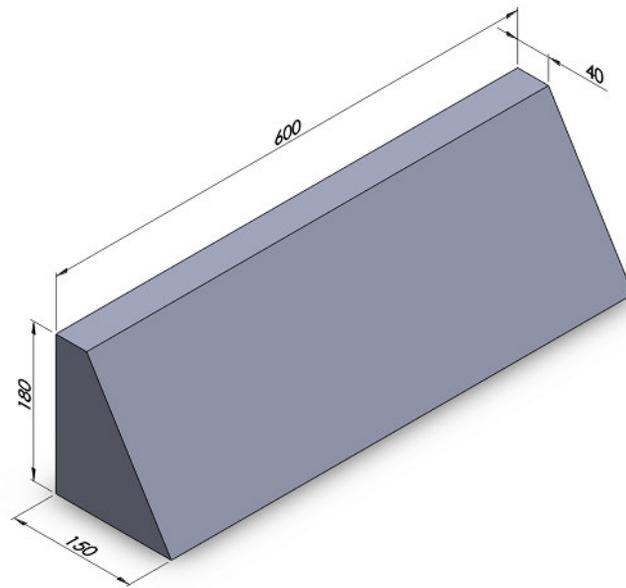


Figura 56 Dimensiones panel de control

El panel de control se divide en 8 secciones, los elementos ubicados en cada sección se detallan en la tabla.

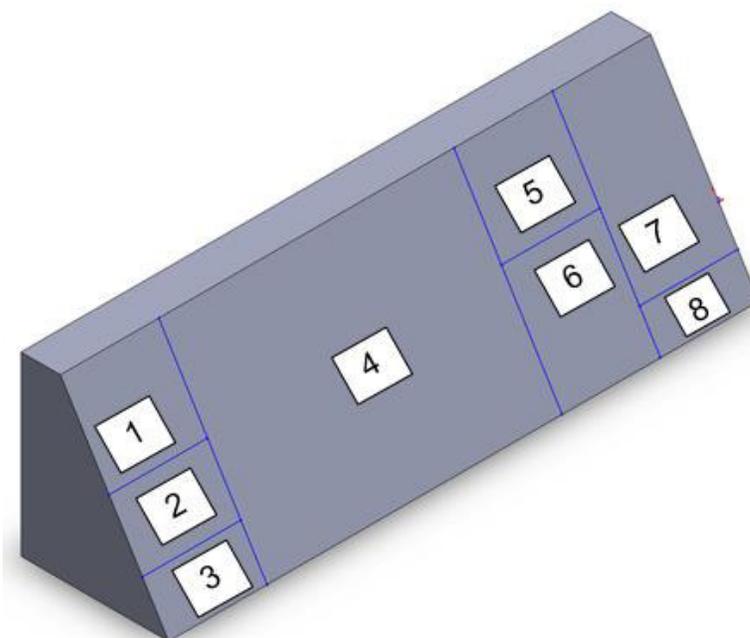


Figura 57 Distribución del panel de control

Tabla 21
Detalle distribución panel de control

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS	
1	PARADA DE EMERGENCIA
2	CONEXIÓN USB / ETHERNET
3	ENCENDIDO / APAGADO
4	PINES DEL PLC
5	SENSORES
6	ACTUADORES
7	FUENTES DE VOLTAJE
8	SIMBOLOGÍA CONECTORES JACK HEMBRA

A continuación, se realiza un esquema general de los elementos que contiene cada sección, seguido de una tabla en la cual se detalla dichos elementos. El primer esquema contiene los elementos de las secciones 1, 2 y 3.

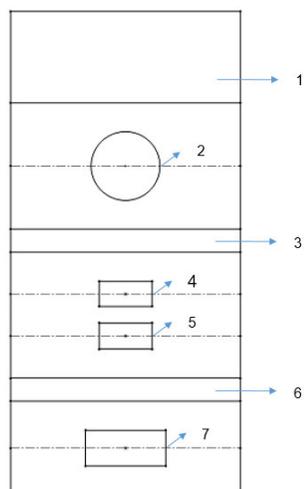


Figura 58 Distribución sección elemento 1,2 y3.

Tabla 22

Distribución sección parada de emergencia, conexión usb/ethernet, encendido/apagado

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN PARADA DE EMERGENCIA, CONEXIÓN USB/ETHERNET, ENCENDIDO/APAGADO	
1	Rótulo – PARADA DE EMERGENCIA
2	Pulsador tipo hongo
3	Rótulo – CONEXIÓN USB / ETHERNET
4	USB
5	Ethernet
6	Rótulo – ENCENDIDO / APAGADO
7	Switch (Interruptor)

El segundo esquema, contiene los elementos de la sección 4, que pertenecen a los pines del PLC. Es este caso, se explica brevemente los pines puestos en cada bornera, para tener una idea de la distribución de los mismo en el panel de control. Los pines se van a detallar de arriba hacia abajo.

Para estudiar a profundidad la funcionalidad de cada pin del PLC, se recomienda revisar el Layout adjuntado al final del documento.

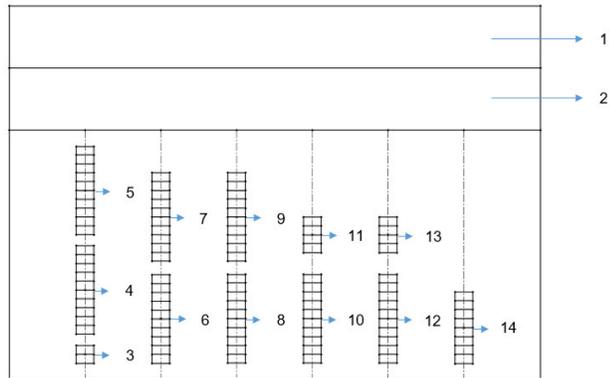


Figura 59 Distribución pines del PLC en el tablero

**Tabla 23
DISTRIBUCIÓN PINES DEL PLC en el tablero sección 4**

DISTRIBUCIÓN PINES DEL PLC																				
1		Rótulo – PANEL DE CONTROL																		
2		Rótulo – SIMBOLOGÍA PINES DEL PLC																		
PINES DELANTEROS DEL PLC																				
3	1	GND	4	1	A	5	1	SCL	6	1	(-) I0.4	7	1	I0.12	8	1	(-) I1.4	9	1	I1.12
	2	24 V		2	B		2	SDA		2	I0.4		2	I0.11		2	I1.4		2	I1.11
				3	Pin 3		3	RX0		3	(-) I0.3		3	I0.10		3	(-) I1.3		3	I1.10
				4	50 SO		4	TX0		4	I0.3		4	I0.9		4	I1.3		4	I1.9
				5	51 SI		5	RX1		5	(-) I0.2		5	I0.8		5	(-) I1.2		5	I1.8
				6	52 SCK		6	TX1		6	I0.2		6	I0.7		6	I1.2		6	I1.7
				7	Reset		7	TX		7	(-) I0.1		7	(-) I0.6		7	(-) I1.1		7	(-) I1.6
				8	Vin 5		8	RX		8	I0.1		8	I0.6		8	I1.1		8	I1.6
				9	Pin 2		9	RX3		9	(-) I0.0		9	(-) I0.5		9	(-) I1.0		9	(-) I0.5
				10	GND		10	TX3		10	I0.0		10	I0.5		10	I1.0		10	I1.4

PINES POSTERIORES DEL PLC														
10	1	Vdc	11	1	GND	12	1	Vdc	13	1	GND	14	1	Aref
	2	COM(-)		2	A1.7		2	COM(-)		2	A0.7		2	IOref 2
	3	Q1.7		3	A1.6		3	Q0.7		3	A0.6		3	IOref 1
	4	Q1.6		4	A1.5		4	Q0.6		4	A0.5		4	10Vdc
	5	Q1.5					5	Q0.5					5	GND
	6	Q1.4					6	Q0.4					6	3.3Vdc
	7	Q1.3					7	Q0.3					7	GND
	8	Q1.2					8	Q0.2					8	5Vdc
	9	Q1.1					9	Q0.1					9	GND
	10	Q1.0					10	Q0.0						

El tercer esquema, contiene los elementos de la sección 5, que pertenecen a los pines de los sensores.

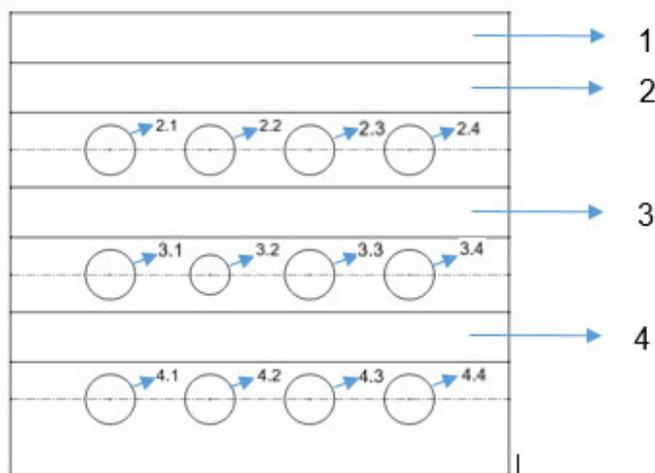


Figura 60 Distribución sección sensores

Tabla 24

Distribución sección sensores

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN SENSORES		
1		Rótulo – SENSORES
2		Rótulo – NIVEL / HC-SR04 / 5 VDC
	2.1	HC-SR04 – VCC
	2.2	HC-SR04 – GND
	2.3	HC-SR04 – ECHO
	2.4	HC-SR04 – TRIGGER
3		Rótulo – CAUDAL / YF-S201 / 5 VDC
	3.1	YF-S201 – VCC
	3.2	YF-S201 – GND
	3.3	YF-S201 – DATA
	3.4	YF-S201 – INDICADOR
4		Rótulo – TEMPERATURA / DS18B20 / 5 VDC
	4.1	DS18B20 – VCC
	4.2	DS18B20 – GND
	4.3	DS18B20 – DATA
	4.4	DS18B20 – INDICADOR

El cuarto esquema, contiene los elementos de la sección 6, que pertenecen a los pines de los actuadores.

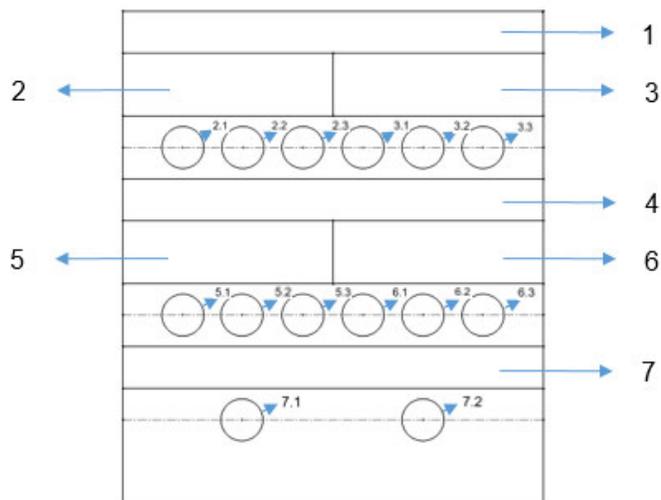


Figura 61 Distribución sección actuadores

Tabla 25
Distribución sección actuadores

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN ACTUADORES		
1		Rótulo – BOMBAS / 12 VDC
2		Rótulo – BOMBA 1
	2.1	Bomba 1 – VCC
	2.2	Bomba 1 – GND
	2.3	Bomba 1 – INDICADOR
3		Rótulo – BOMBA 2
	3.1	Bomba 2 – VCC
	3.2	Bomba 2 – GND
	3.3	Bomba 2 – INDICADOR
4		Rótulo – VÁLVULAS / 24 VDC
5		Rótulo – VÁLVULA 1
	5.1	Válvula 1 – VCC
	5.2	Válvula 1 – GND
	5.3	Válvula – INDICADOR
6		Rótulo – VÁLVULA 2
	6.1	Válvula 2 – VCC
	6.2	Válvula 2 – GND
	6.3	Válvula 2 – INDICADOR
7		Rótulo – NIQUELINA / 110 VAC
	7.1	Niquelina – VCC
	7.2	Niquelina – GND

El quinto esquema, contiene los elementos de la sección 7, que pertenecen a los pines de las fuentes de voltaje.

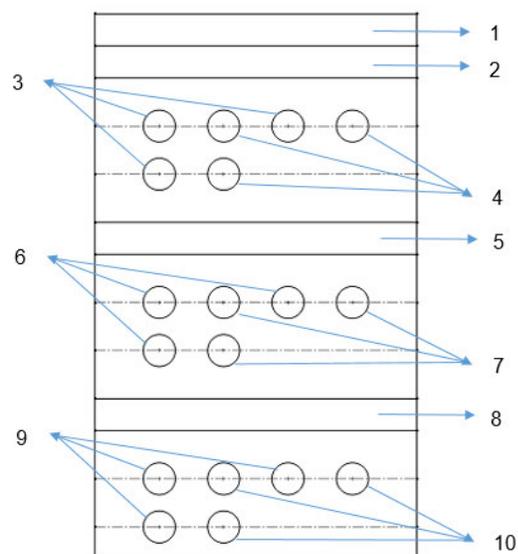


Figura 62 Distribución sección fuentes de voltaje

Tabla 26
Distribución sección fuentes de voltaje

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN FUENTES DE VOLTAJE	
1	Rótulo – FUENTES DE VOLTAJE
2	Rótulo – 5 VDC
3	5 VDC – VCC
4	5 VDC – GND
5	Rótulo – 12 VDC
6	12 VDC – VCC
7	12 VDC – GND
8	Rótulo – 24 VDC
9	24 VDC – VCC
10	24 VDC – GND

El sexto esquema, contiene los elementos de la sección 8, que pertenecen a la simbología de los conectores.



Figura 63 Distribución sección simbología conectores jack hembra

Tabla 27

Distribución sección simbología conectores jack hembra

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN SIMBOLOGÍA CONECTORES JACK HEMBRA	
1	Rótulo – SIMBOLOGÍA CONECTORES JACK HEMBRA
2	Rótulo – Color rojo VCC
3	Rótulo – Color negro GND
4	Rótulo – Color blanco DATA

3.4.6.2. LUCES INDICADORAS

El panel de control cuenta con siete diodos led, los cuales tienen la función de indicar que sensores, válvulas y bombas están alimentados por medio de las fuentes de voltaje localizadas en el mismo panel de control. Tres diodos led indican la activación de los sensores de caudal, presión y temperatura, dos diodos led indican la activación de las dos válvulas, y otros dos la activación de las dos bombas.

Estos diodos led se encienden con 3V DC, y en el panel de control se dispone de tres fuentes distintas, una fuente de 5V DC, otra de 12V DC y finalmente una fuente de 24V DC, por lo tanto, se ha diseñado tres circuitos de acondicionamiento necesarios para reducir el voltaje proporcionado por las fuentes, para obtener el voltaje necesario para encender los diodos led. Estos circuitos fueron diseñados aplicando el principio de división de tensión.

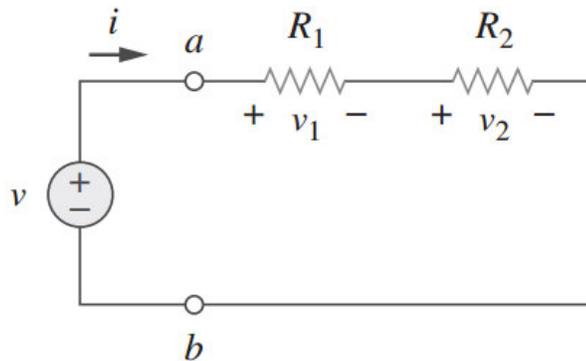


Figura 64 Circuito de un solo lazo con dos resistores en serie

Fuente: (Sadiku, 2006)

Para determinar el voltaje en la resistencia R_2 se utiliza la siguiente ecuación. Esta ecuación se aplicó para el diseño de los circuitos de acondicionamientos necesarios para el encendido de los diodos led.

$$v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v$$

Suponiendo una $R_2 = R_4 = R_6 = 1k\Omega$ que es el valor de una resistencia comercial, y teniendo los valores de voltaje de entrada y salida, se calcula el valor de R_1 . En caso de que el valor de R_1 no sea de un valor comercial, se procede a seleccionar una resistencia del valor más cercano existente en el mercado.

Para la fuente de 5V DC

$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{in}$$

$$3 = \frac{1 \times 10^3}{R_1 + 1 \times 10^3} \cdot 5$$

$$R_1 = 666.6\Omega \rightarrow 680\Omega$$

Para la fuente de 12V DC

$$v_{out} = \frac{R_2}{R_3 + R_4} v_{in}$$

$$3 = \frac{1 \times 10^3}{R_3 + 1 \times 10^3} \cdot 12$$

$$R_3 = 4000 \Omega \rightarrow 3.9 \text{k}\Omega$$

Para la fuente de 24V DC

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_5 + R_6} V_{\text{in}}$$

$$3 = \frac{1 \times 10^3}{R_5 + 1 \times 10^3} \cdot 24$$

$$R_5 = 8000 \Omega \rightarrow 8.2 \text{k}\Omega$$

Simulación

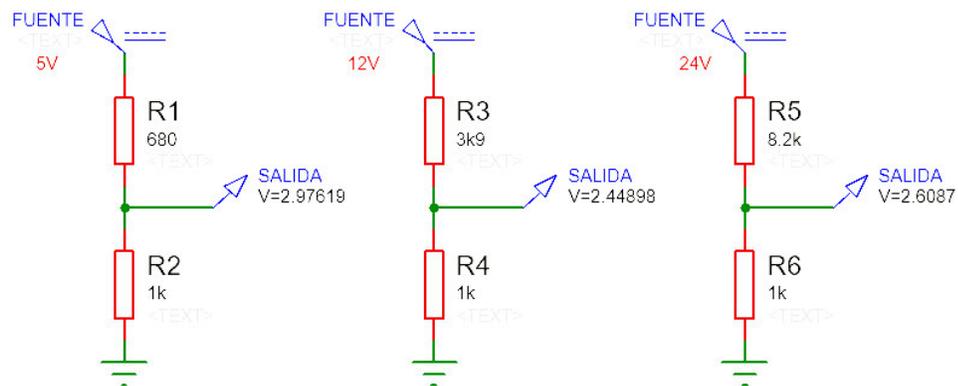


Figura 65 Divisores de tensión



Figura 66 Panel de control instalado en el módulo

3.4.7. PANEL DE CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTOS

3.4.7.1. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO ELECTROVÁLVULAS

Para el funcionamiento de las electroválvulas se utilizaron dispositivos electromagnéticos llamados relés, los cuales se activan con 5 VDC y tienen la función de abrir o cerrar un circuito que disipa una potencia mayor que el circuito de activación, en este los relés activan el circuito para accionar las electroválvulas de 24 VDC.

Este módulo cuenta con cuatro relés, en donde GND y COM son pines conectados entre sí, permitiendo que la activación de cada relé se realice con la activación de las entradas individuales de cada dispositivo. El diagrama de conexión del circuito de acondicionamiento para el funcionamiento de las electroválvulas se representa en la figura.

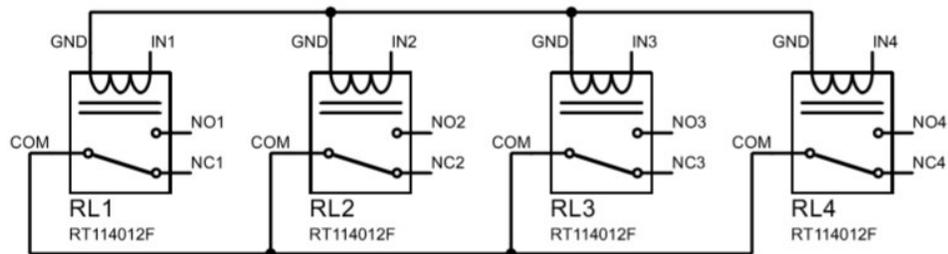


Figura 67 Circuito de acondicionamiento electroválvulas

La distribución de los elementos usados para el diseño del circuito de acondicionamiento es la siguiente.

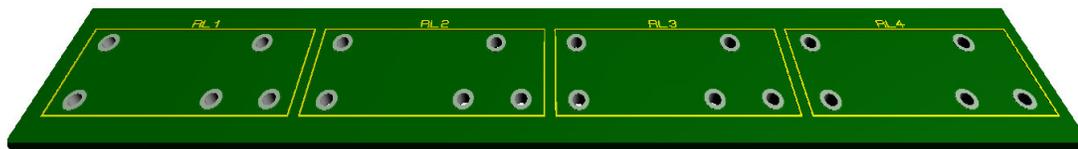


Figura 68 Placa circuito de acondicionamiento

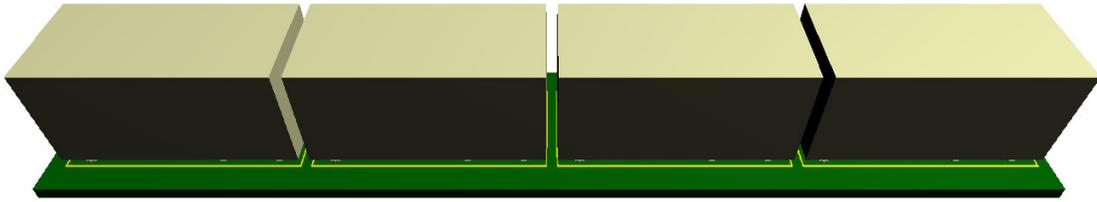


Figura 69 Distribución de elementos

3.4.7.2. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO NIQUELINA

Para el funcionamiento de la niquelina se realizó un circuito de potencia, el cual permite la activación de la niquelina mediante una señal enviada por el microcontrolador. Este circuito está compuesto principalmente de dos dispositivos, un opto-acoplador MOC3121 y un TRIAC de potencia BT137. En este caso no se utiliza relé ya que se requiere una mayor velocidad de conmutación y ausencia de rebotes, características que son proporcionadas por el opto-acoplador.

Para el diseño del circuito de acondicionamiento de la niquelina se seleccionó el TRIAC ya que permite conmutar la corriente alterna, y el opto-acoplador ya que en su encapsulado tiene un circuito que permite aislar el circuito de control de el de la carga, protegiendo de esta manera el microcontrolador.

El diagrama de conexión del circuito de acondicionamiento para la niquelina se representa en la figura.

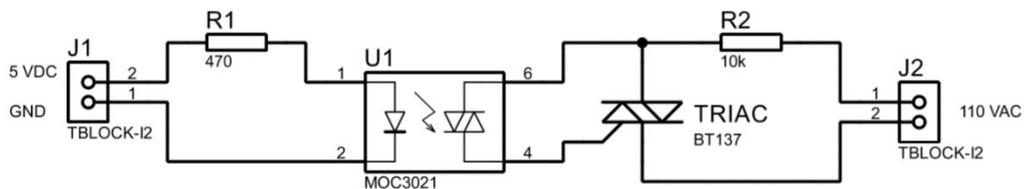


Figura 70 Circuito de acondicionamiento niquelina

La distribución de los elementos usados para el diseño del circuito de acondicionamiento es la siguiente.

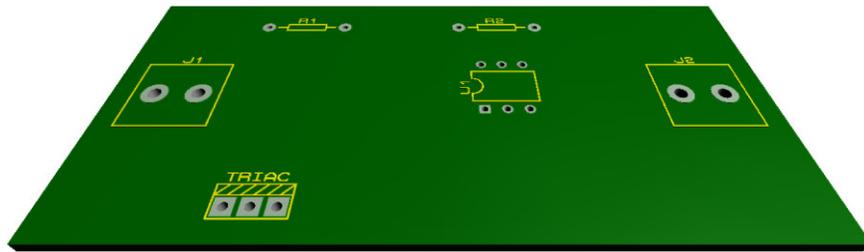


Figura 71 Placa circuito de acondicionamiento

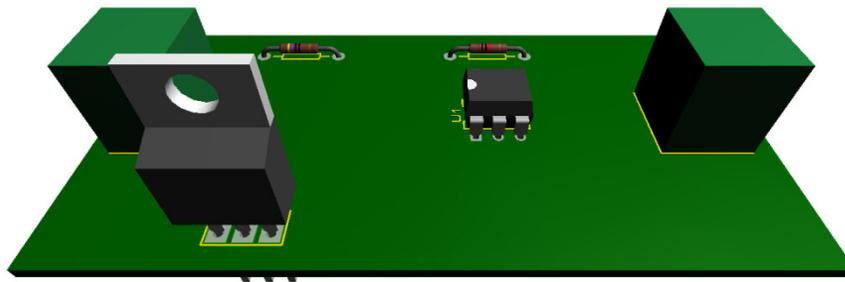


Figura 72 Distribución de elementos

3.4.7.3. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO BOMBAS

Para el funcionamiento de las bombas se realizó un circuito que nos permite el control de las bombas mediante el PWM del microcontrolador. Este circuito consta de transistores MOSFET de potencia IRFZ44N y diodos.

Se seleccionó el transistor de potencia MOSFET ya que controla el paso de corriente, este control es llevado a cabo entre la entrada (source) y la salida (drain), mediante la aplicación de voltaje en el terminal denominado puerta (gate). Se realizó el control de paso de corriente, ya que las bombas trabajan con corrientes altas, mientras que el microcontrolador soporta una corriente mínima.

El diodo cumple dos funciones específicas dentro del diseño del circuito. La primera es rectificar la corriente, y la segunda es de proteger el microcontrolador, ya que no permite que la corriente circule en dos direcciones.

El diagrama de conexión del circuito de acondicionamiento para las bombas se representa en la figura.

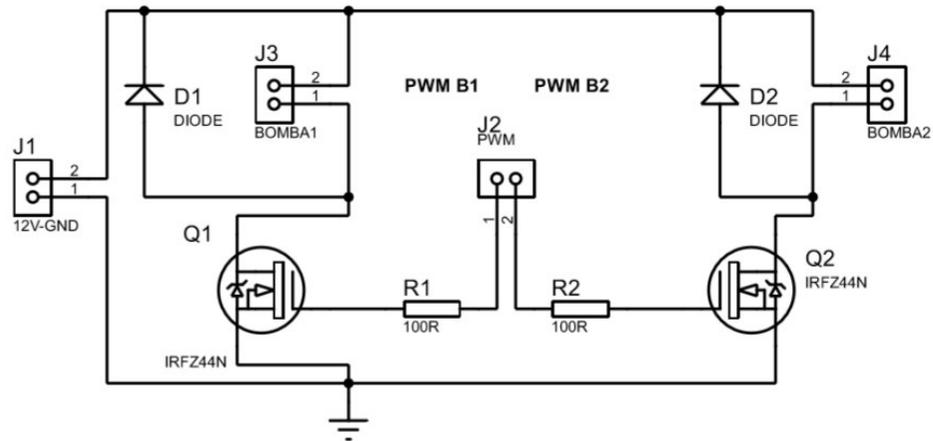


Figura 73 Circuito de acondicionamiento bombas

La distribución de los elementos usados para el diseño del circuito de acondicionamiento es la siguiente.

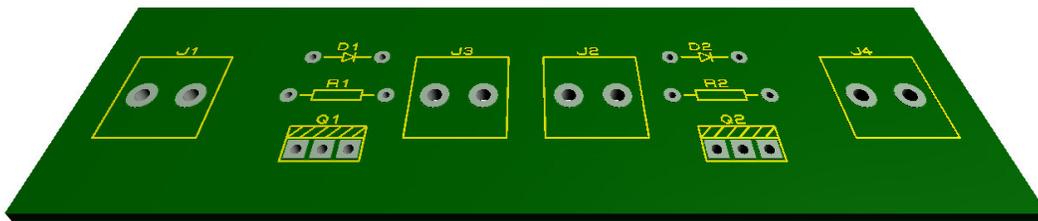


Figura 74 Placa circuito de acondicionamiento

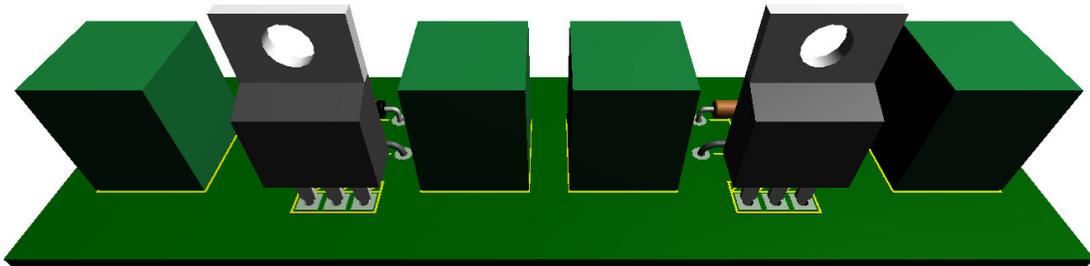


Figura 75 Distribución de elementos

3.4.7.4. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL DE CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO

Se selecciona como pines de conexión borneras para placas de circuito impreso, ya que estas pueden ser funcionales con los voltajes y corrientes de los

diferentes elementos de la máquina y son de fácil manipulación. La distribución de los pines en el panel se los indica en las siguientes figuras.

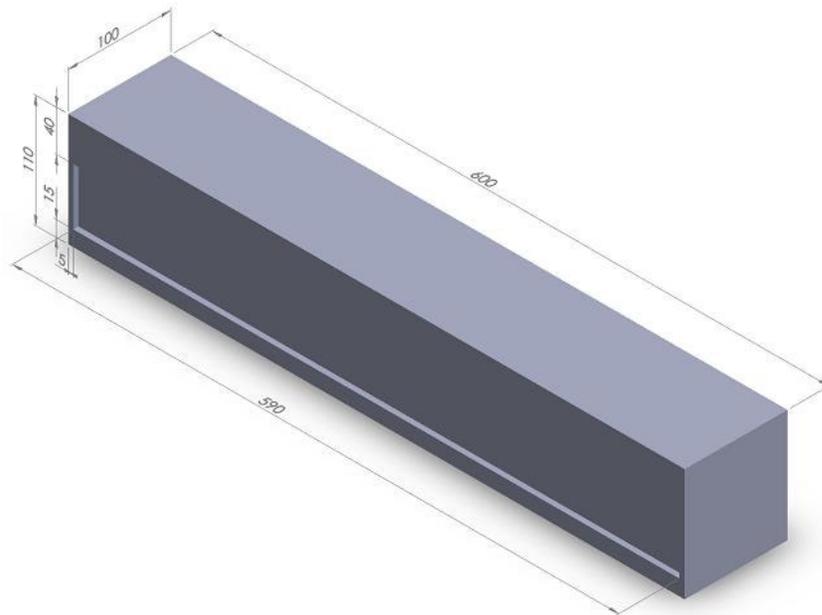


Figura 76 Dimensiones panel circuitos de acondicionamiento

El panel que contiene los circuitos de acondicionamiento se divide en 4 secciones, los elementos ubicados en cada sección se detallan en la tabla.

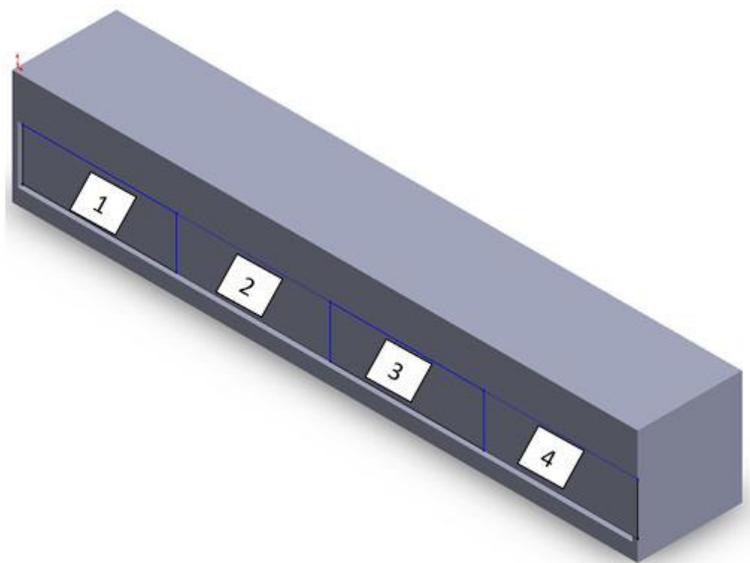


Figura 77 Distribución del panel circuitos de acondicionamiento

Tabla 28

Detalle distribución circuitos de acondicionamiento

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS	
1	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO VÁLVULAS
2	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO BOMBAS
3	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO NIQUELINA
4	TOMA 110 VAC

A continuación, se realiza un esquema general de los elementos que contiene cada sección, seguido de una tabla en la cual se detalla dichos elementos. El primer esquema contiene los elementos de la sección 1, los pines puestos en cada bornera se van a detallar de arriba hacia abajo.

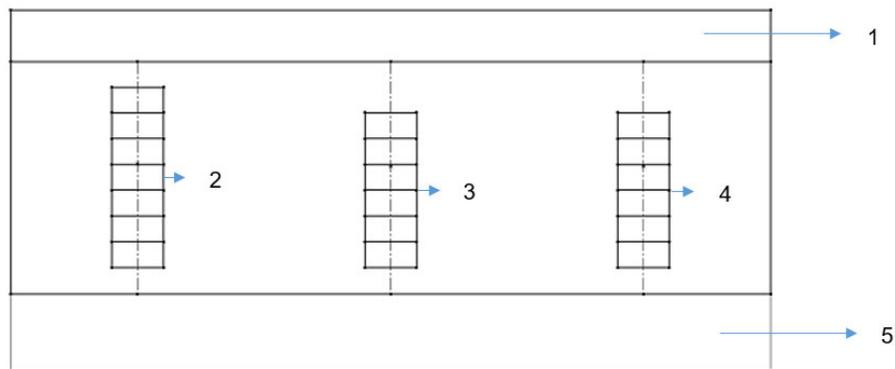


Figura 78 Distribución sección circuito de acondicionamiento válvulas

Tabla 29

Distribución sección circuito de acondicionamiento válvulas

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO VÁLVULAS								
1	Rótulo – VÁLVULAS							
2	1	VCC	3	1	NC1	4	1	NC3
	2	GND		2	COM1		2	COM3
	3	IN1		3	NO1		3	NO3
	4	IN2		4	NC2		4	NC4
	5	IN3		5	COM2		5	COM4
	6	IN4		6	NO2		6	NO4
	7	COM						
5	Rótulo – RELÉS / 5 VDC							

El segundo esquema, contiene los elementos de la sección 2, que pertenecen a los pines del circuito de acondicionamiento de las bombas.

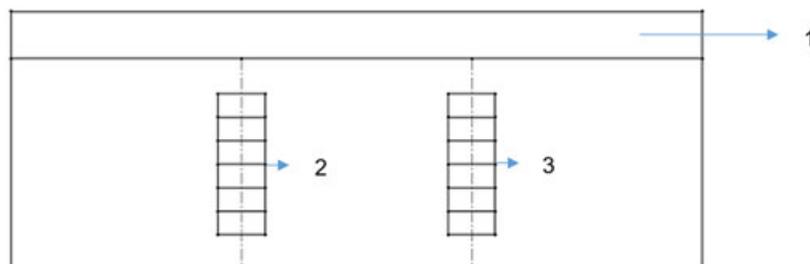


Figura 79 Distribución sección circuito de acondicionamiento bombas

Tabla 30

Distribución sección circuito de acondicionamiento bombas

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO BOMBAS	
1	Rótulo – BOMBAS
BOMBA1	
2	PWN
	GND
	12 VDC
	GND
	+ CARGA
	- CARGA
BOMBA2	
3	PWN
	GND
	12 VDC
	GND
	+ CARGA
	- CARGA

El tercer esquema, contiene los elementos de la sección 3, que pertenecen a los pines del circuito de acondicionamiento de la niquelina.

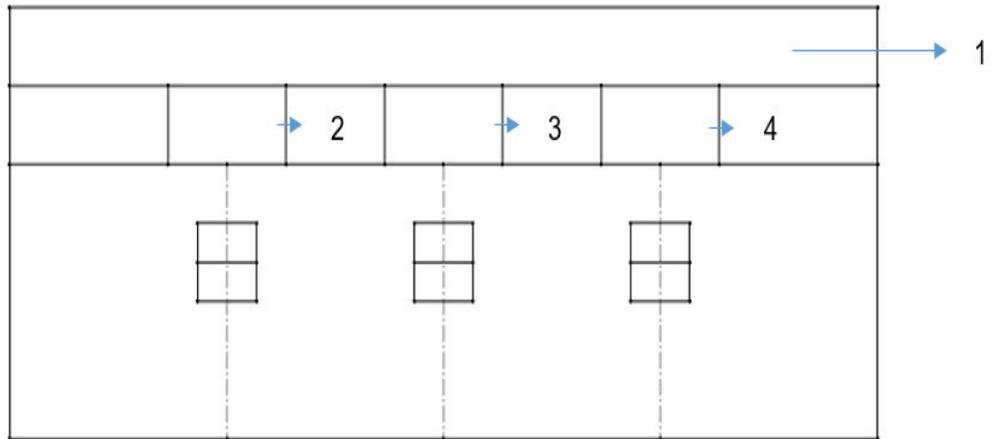


Figura 80 Distribución sección circuito de acondicionamiento níquelina

Tabla 31

Distribución sección circuito de acondicionamiento níquelina

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO NIQUELINA	
1	Rótulo – NIQUELINA
2	Rótulo – 110 VAC
3	Rótulo – PWM
4	Rótulo – CARGA

El cuarto esquema, contiene los elementos de la sección 4, que pertenecen al tomacorriente doble con tierra de 110 VAC.

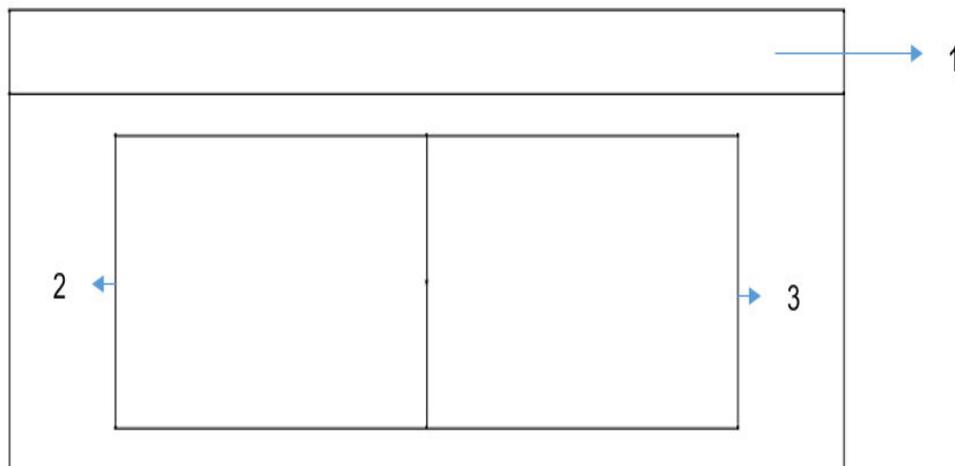


Figura 81 Distribución sección tomacorriente 110 VAC

Tabla 32
Distribución sección circuito de acondicionamiento niquelina

DISTRIBUCIÓN SECCIÓN TOMACORRIENTE 110 VAC	
1	Rótulo – TOMA / 110 VAC
2	TOMA 1
3	TOMA 2



Figura 82 Panel circuitos de acondicionamiento instalado en el módulo

3.4.8. INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Para el cableado del panel de control a la caja de control se utilizó diferentes cables de acuerdo al requerimiento de corriente y voltaje que se necesitan. Quedando seleccionados de la siguiente forma.

Tabla 33
Tabla de voltajes y corrientes que circular por el cableado.

<u>Elemento</u>	<u>Voltaje</u>	<u>Corriente</u>	<u>Tipo de Cable</u>
Pines del PLC	Max 12V DC	Max 0.3A	T/TBW 22-2
Bombas	12V DC	Max 7.5 A	16 AWG
Electroválvulas	24V DC	0.3 A	16 AWG
Niquelina	110V AC	10 A	12 AWG
Fuentes	5,12 y 24 V DC	-	16 AWG
Alimentación de las Fuentes	110V AC	-	12 AWG

Para el cableado de alimentación eléctrica de fuentes de 5V DC, 12V DC, 24V DC y una toma de 110 V AC, se realizó un control a través de un switch de doble estado, el cual nos ayudará a encender y apagar el equipo, además se incluye un botón de emergencia tipo hongo que desactivará todo el sistema en caso de estar presionado, el cableado eléctrico se ilustra a continuación.

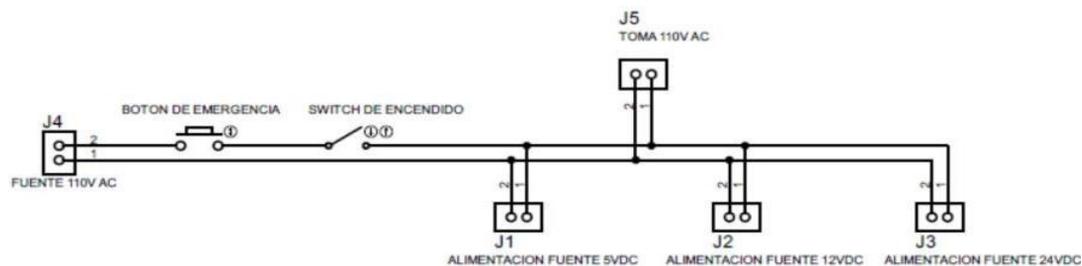


Figura 83 Distribución del cableado de alimentación de fuentes

El cableado de señales se basa en la placa de control del PLC M-DUINO la cual corresponde a un Arduino Mega 2560, del cual se obtienen los diferentes pines de control y de adquisición de datos se utilizará para, poner en funcionamiento el equipo y poder controlar los diferentes actuadores. Las conexiones de señales se realizaron como se indican a continuación.

Tabla 34

Tabla Distribución de señales

SENSOR/ACTUADOR	NOMBRE	E/S	TIPO	PIN
Temperatura	Señal Temp.	E	PWM	2
Nivel	Echo	E	PWM	21
	Trigger	S	PWM	20
Caudal	Señal Caudal	E	PWM	3
Electroválvulas	Electrovalvula1	S	Digital	40
	Electrovalvula2	S	Digital	39
Bombas	Bomba1	S	PWM	6
	Bomba2	S	PWM	5
Niquelina	Niquelina	S	Digital	38

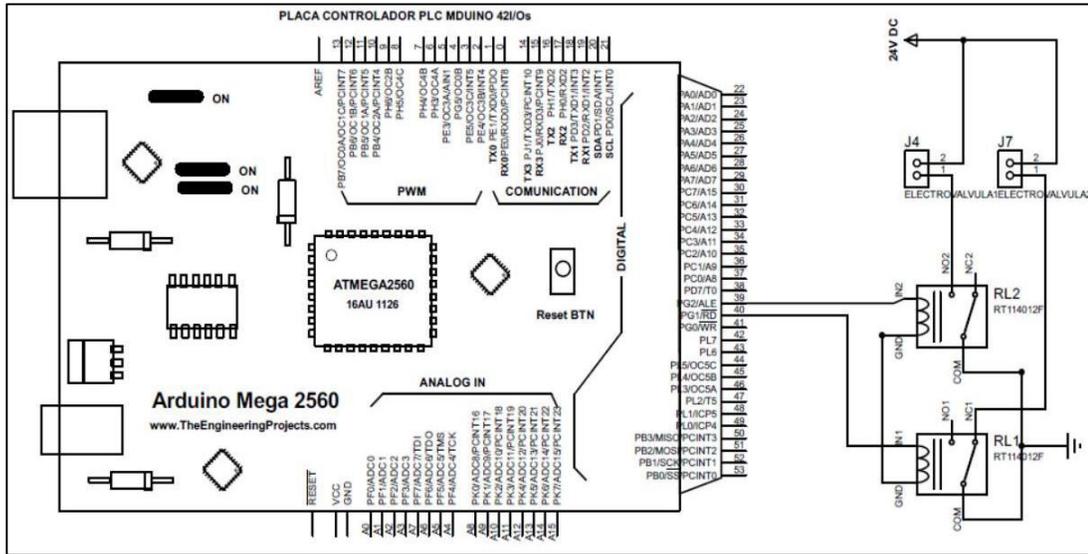


Figura 84 Cableado señales electroválvulas

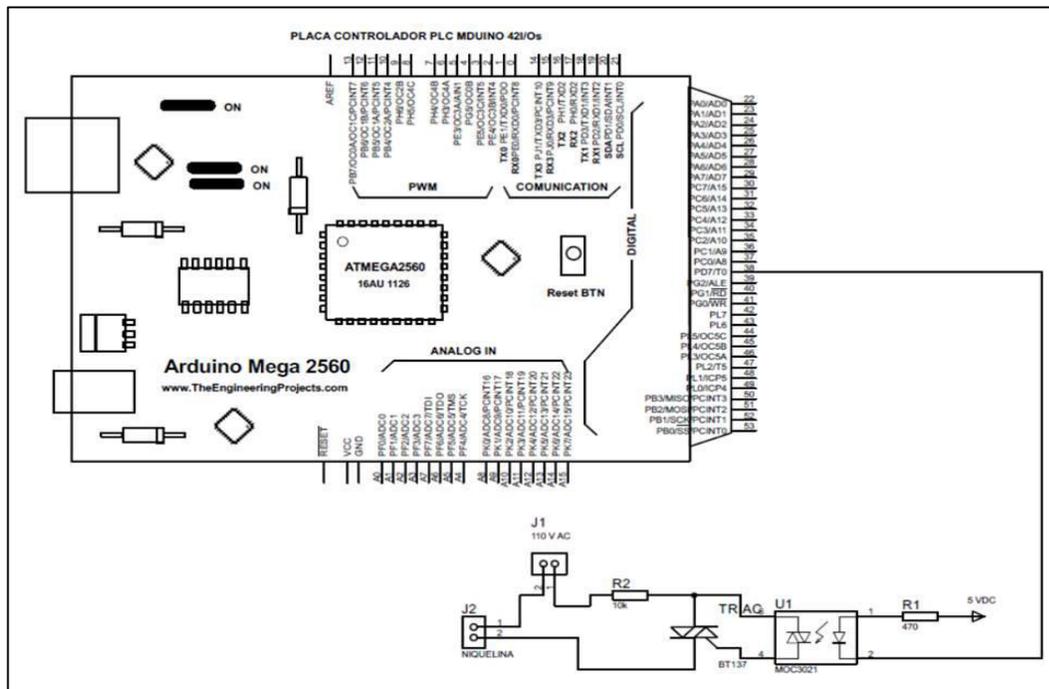


Figura 85 Cableado de señales niquelina



Figura 88 Módulo didáctico final

CAPÍTULO IV

4. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO

4.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PI PARA CONTROL DE NIVEL

4.1.1. OBTENCIÓN DE LA PLANTA

Para obtener la planta Nivel-Llenado se tomó los datos obtenidos del sensor con un tiempo de muestreo de 1.2 segundos. Estos datos se pasaron a la pestaña de variables en MATLAB y haciendo uso del comando IDENT se obtuvo la planta.

Tabla 35
Datos Sensor Ultrasónico

ENTRADA	SALIDA
1	0
1	0,11
1	0,19
1	0,30
1	0,19
1	0,50
1	0,61
1	0,71
1	0,79
1	0,90
1	1

Import Data

Data Format for Signals

Time-Domain Signals

Workspace Variable

Input: entrada

Output: salida

Data Information

Data name: NIVEL

Starting time: 0

Sample time: 1.2

More

Import Reset

Close Help

Figura 89 Importación de datos

Transfer Functions

Model name: tf1

Number of poles: 2

Number of zeros: 1

Continuous-time Discrete-time (Ts = 1.2) Feedthrough

I/O Delay

Estimation Options

Estimate Close Help

Figura 90 Asignación de polos y ceros

Obteniendo la planta que se indica a continuación.

$$G_p(s) = \frac{0.4301s + 0.1463}{s^2 + 1.369s + 0.3727}$$

A la planta obtenida se le realiza la retroalimentación con el comando FEEDBACK, obteniendo de esta manera la planta a la cual se va a realizar el control.

$$G_c(s) = \frac{0.43s + 0.15}{s^2 + 1.80s + 0.52}$$

4.1.2. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Haciendo uso de la herramienta PID TOOL que nos ofrece MATLAB se obtiene las constantes que se requieren para realizar el control de la planta.

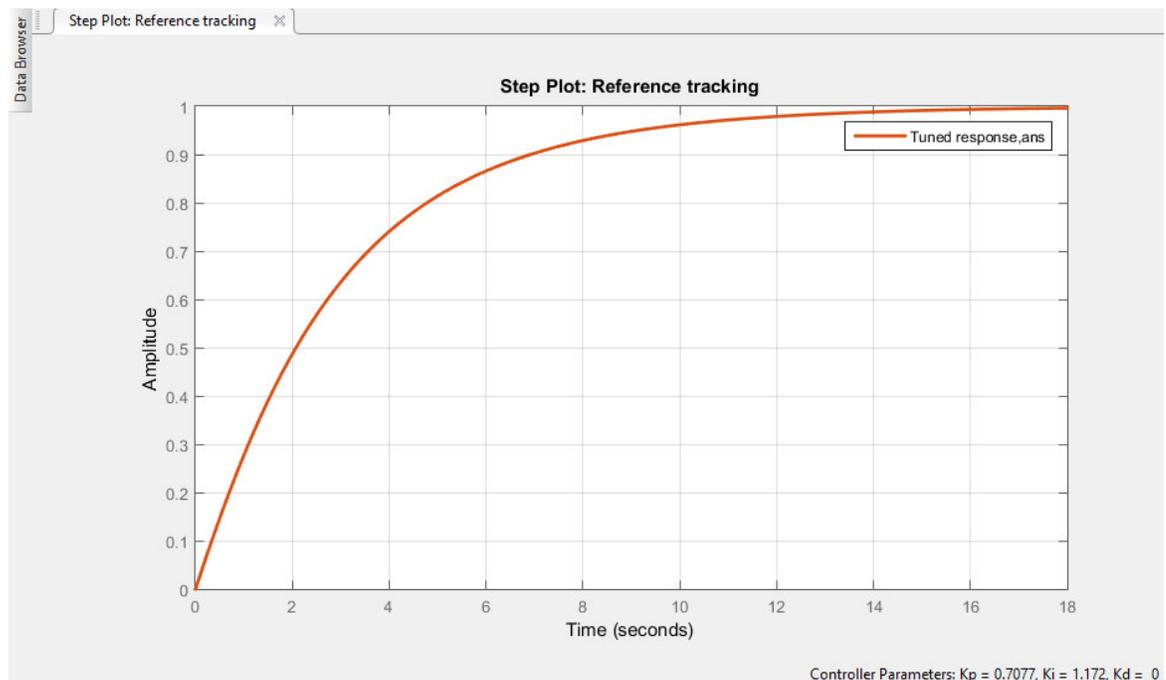


Figura 91 Control PI planta nivel

Obteniendo de esta manera los siguientes datos:

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.70773
Ki	1.1721
Kd	0
Tf	

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	6.58 seconds
Settling time	12.2 seconds
Overshoot	0 %
Peak	0.998
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90 deg @ 0.338 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 92 Parámetros del controlador

4.2. DISEÑO DEL CONTROLADOR FUZZY PARA CONTROL DE CAUDAL

Para el diseño del control FUZZY primero se identifica las variables que van a actuar en el sistema. Como entrada se cuenta con el SetPoint.

Se asignan cinco variables de estado tanto para el SetPoint y tres para el error. Las variables de estado para el SetPoint se asumen en las siguientes etiquetas lingüísticas: bajo (B), medio bajo (MB), normal (N), medio alto (MA), y alta (A). Mientras que, para el error, error bajo (EB), error medio (EM) y error alto (EA).

Se asignan cinco variables de control para la regulación de los pulsos de caudal. Estas variables de control se asumen en las siguientes etiquetas lingüísticas: caudal bajo (CB), caudal medio bajo (CMB), caudal normal (CN), caudal medio alto (CMA), y caudal alto (CA).

Partiendo de las variables de estado y las variables de control se realiza el FAM (Fuzzy Association Matrix).

Tabla 36
Matriz de variables

	ERROR		
SetPoint	EB	EM	EA
B	CB	CN	CB
MB	CMB	CMB	CMA
N	CN	CN	CMA
MA	CMA	CMA	CMB
A	CA	CMA	CB

Haciendo uso de la herramienta FUZZY de MATLAB se procede a configurar las entradas y salidas del sistema. En cada una se determina el nombre, el tipo, y el rango, que generalmente se asigna de 0 a 1.

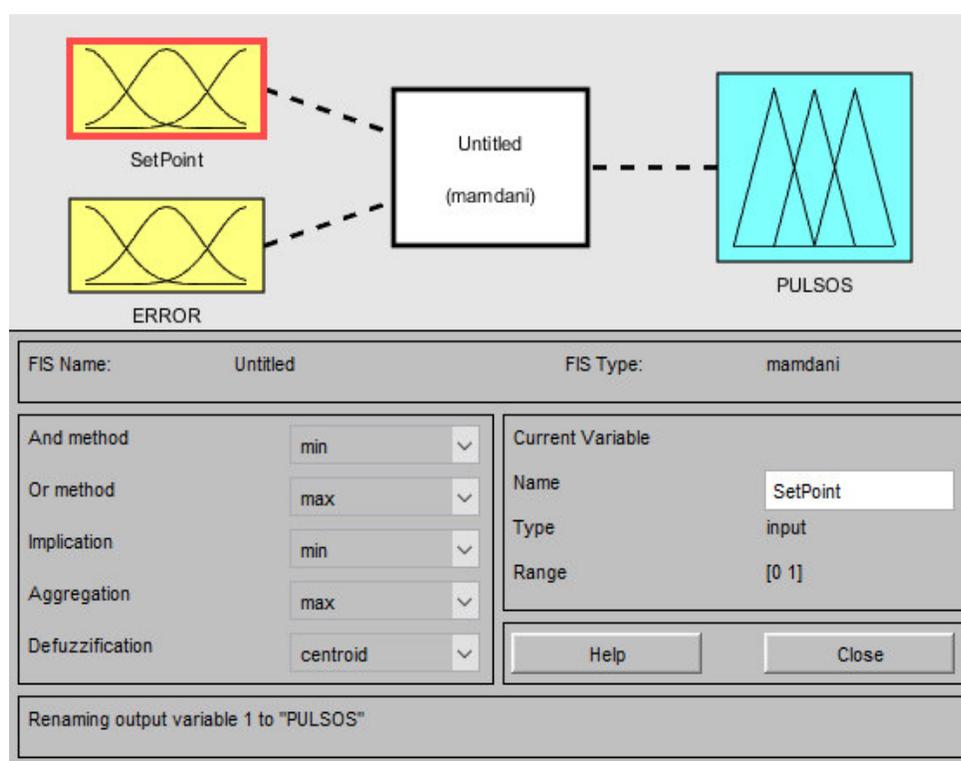


Figura 93 Configuración de entradas y salidas

Se configura las entradas TEMPERTURA Y ERROR y la salida POTENCIA.NIQUELINA. En esta configuración se asigna el nombre y los parámetros para las diferentes variables de estado.

Para la temperatura, con las etiquetas lingüísticas baja (B), normal (N) y alta (A).

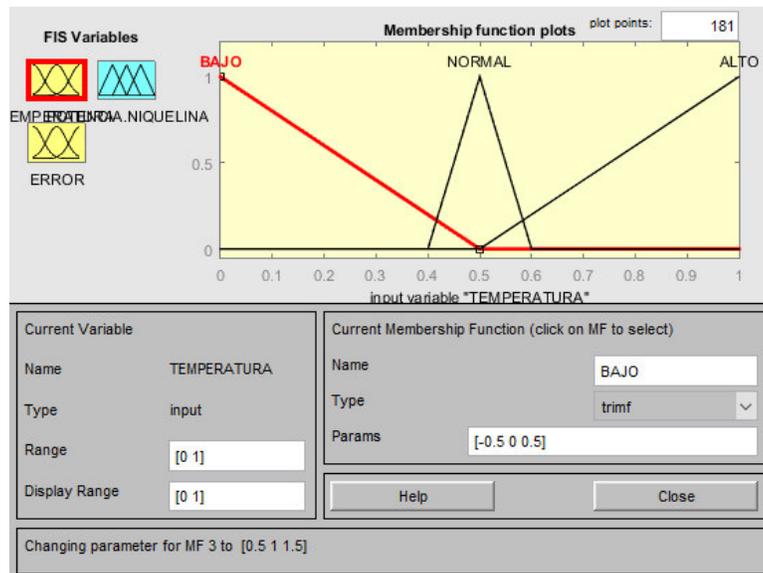


Figura 94 Rango temperatura BAJA

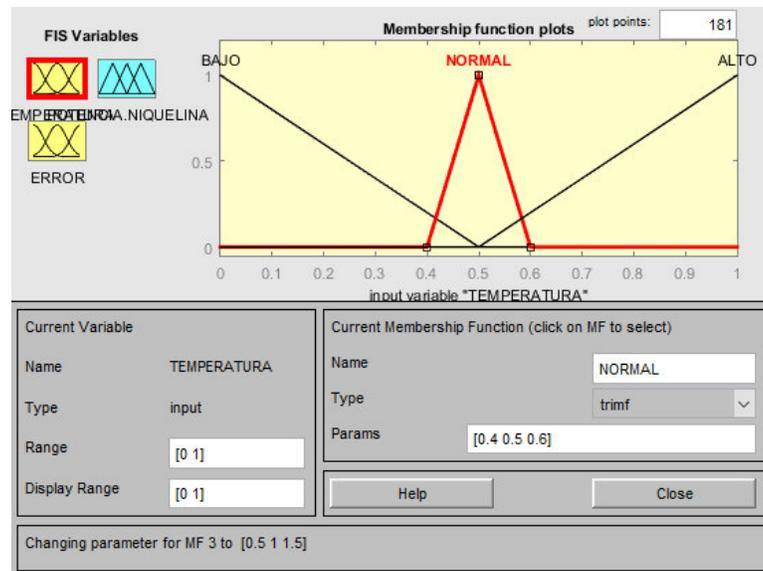


Figura 95 Rango temperatura NORMAL

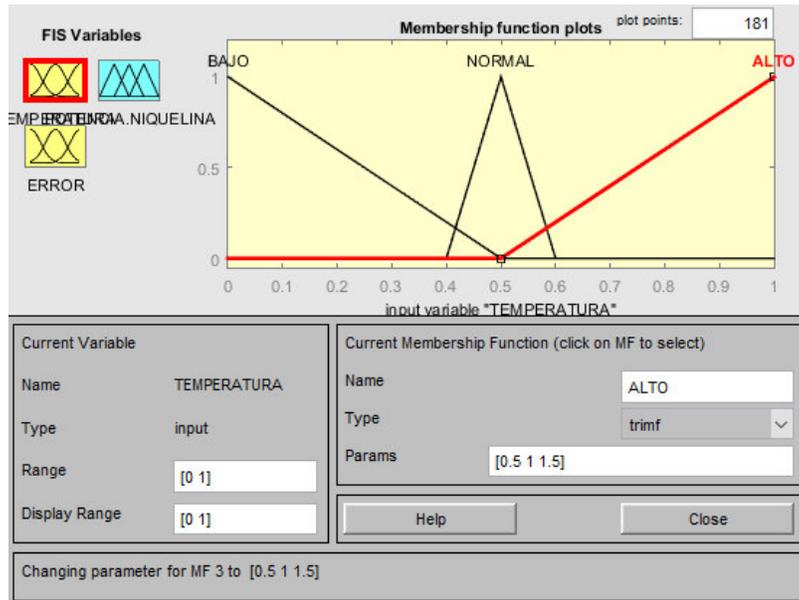


Figura 96 Rango temperatura ALTA

Para el error con las etiquetas lingüísticas: error bajo (EB), error medio (EM) y error alto (EA).

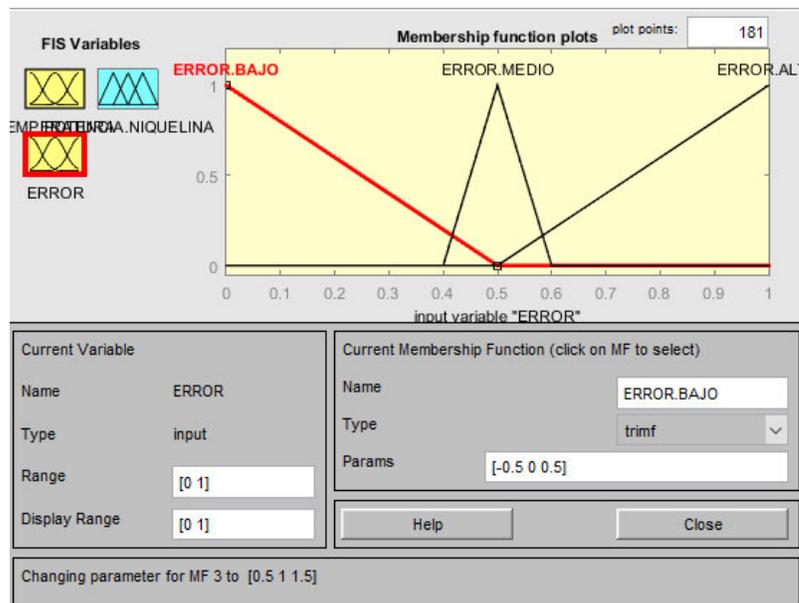


Figura 97 Rango error BAJO

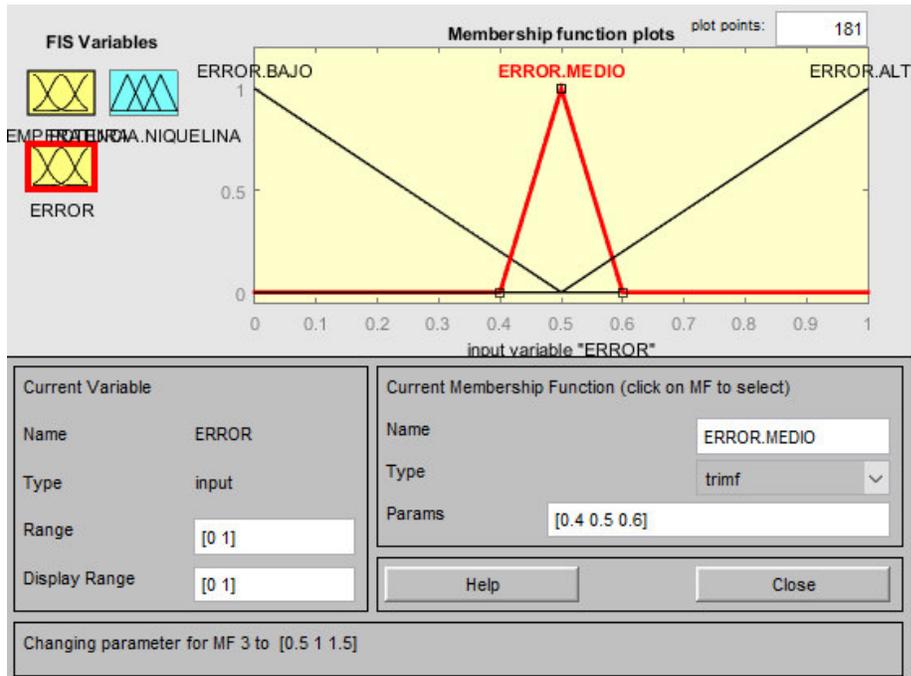


Figura 98 Rango error MEDIO

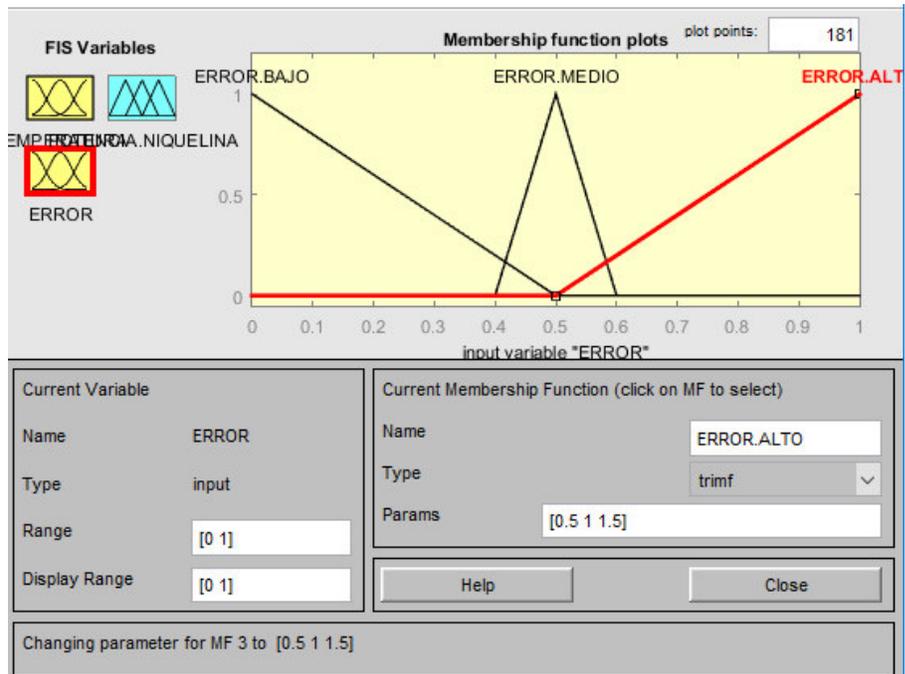


Figura 99 Rango error ALTO

Para la potencia de la niquelina con las etiquetas lingüísticas: baja potencia (BP), media potencia (MP) y alta potencia (AP).

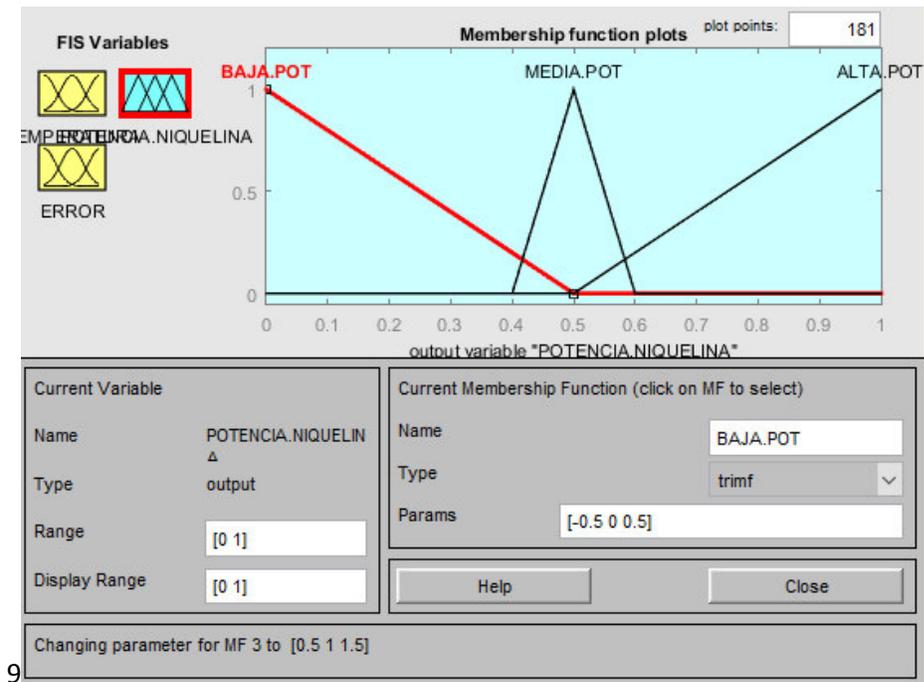


Figura 100 Rango potencia BAJA

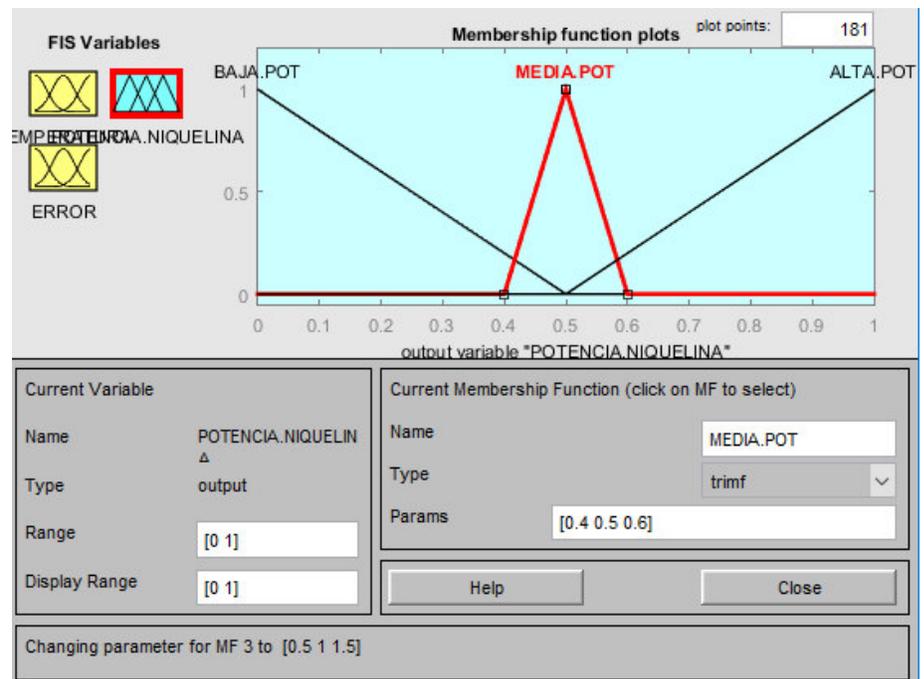


Figura 101 Rango potencia MEDIA

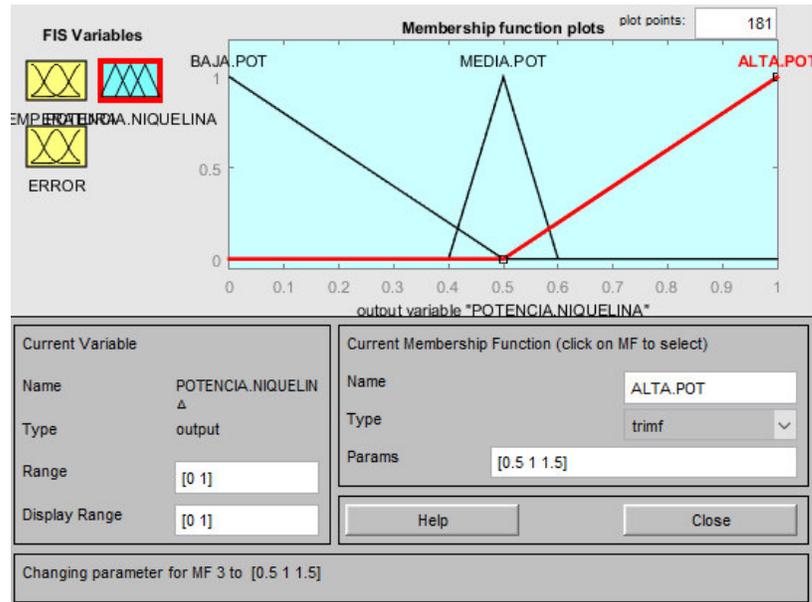


Figura 102 Rango potencia ALTA

Al tener configurado todas las variables de estado y de control se procede a programar las reglas. Para realizar la programación se guía de la matriz de variables.

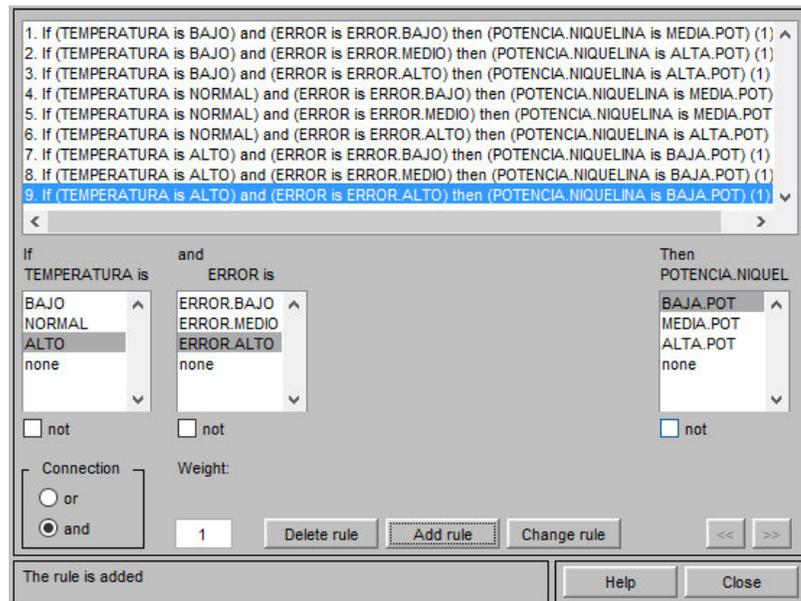


Figura 103 Programación reglas de control FUZZY

Finalmente, se puede observar de manera gráfica como se ejerce la relación, entre la temperatura, el error, y la potencia de la niquelina.

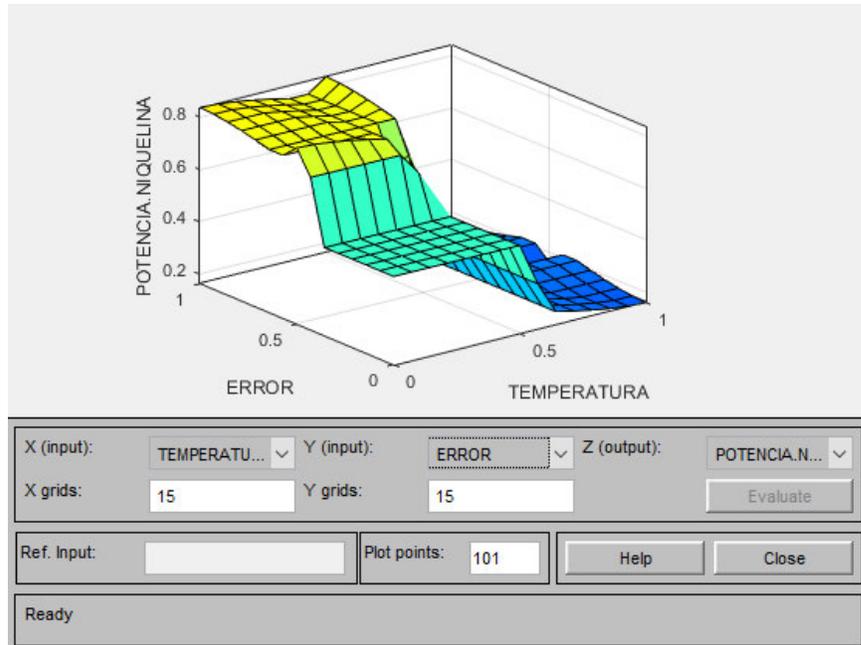


Figura 104 Relación temperatura-error-potencia.niquelina

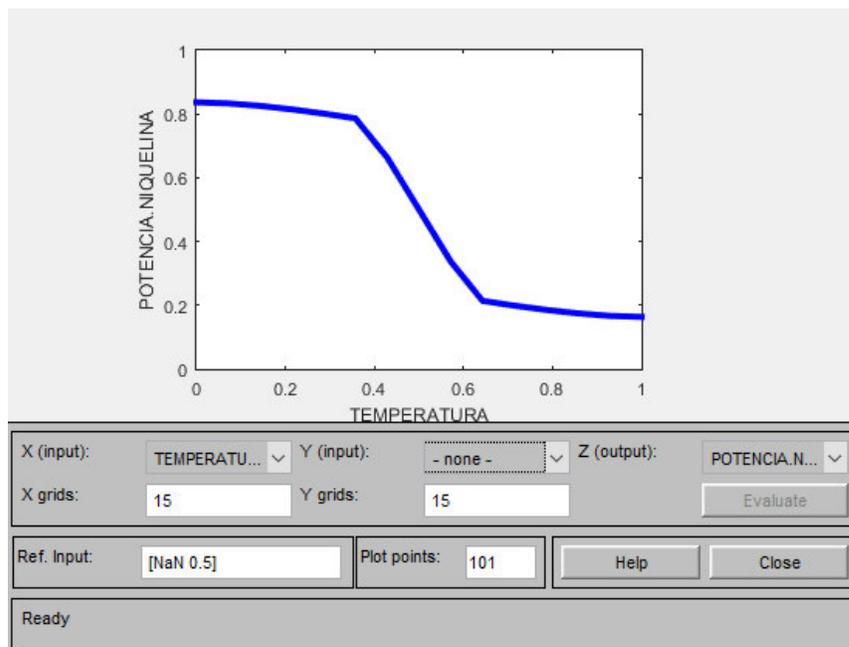


Figura 105 Relación temperatura-potencia.niquelina

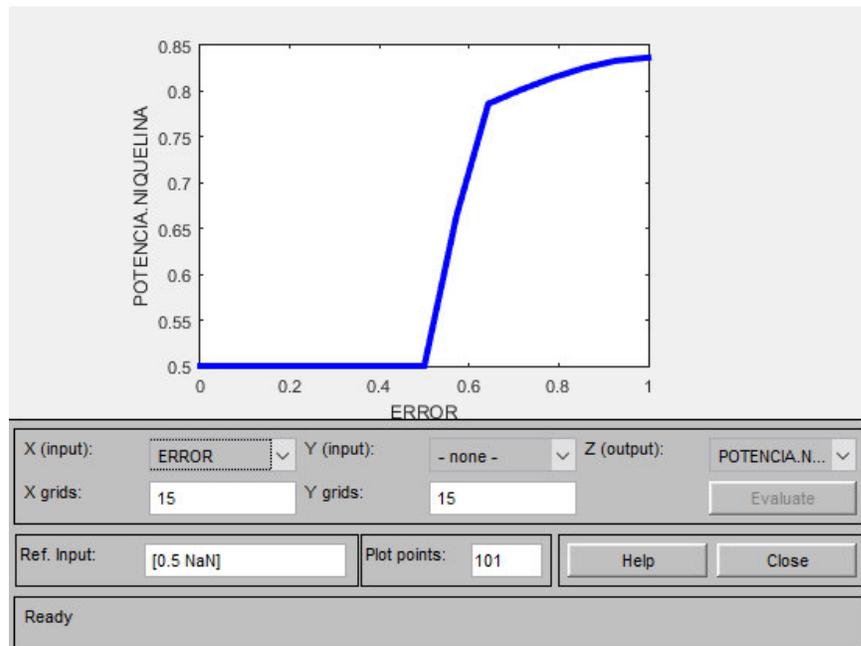


Figura 106 Relación error-potencia.niquelina

4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR FUZZY PARA CONTROL DE TEMPERATURA

Para el diseño del control FUZZY primero se identifica las variables que van a actuar en el sistema. Como entradas se cuenta con la temperatura a la cual se encuentra el agua, y el error que resulta de restar la temperatura proporcionada por el sensor del SetPoint.

Se asignan tres variables de estado tanto para la temperatura como para el error. Las variables de estado para la temperatura se asumen en las siguientes etiquetas lingüísticas: baja (B), normal (N) y alta (A). Mientras que, para el error, error bajo (EB), error medio (EM) y error alto (EA).

Se asignan tres variables de control para la potencia de la niquelina. Estas variables de control se asumen en las siguientes etiquetas lingüísticas: alta potencia (AP), media potencia (MP) y baja potencia (BP).

Partiendo de las variables de estado y las variables de control se realiza el FAM (Fuzzy Association Matrix).

Tabla 37
Matriz de variables

	ERROR		
TEMPERATURA	EB	EM	EA
B	MP	AP	AP
N	MP	MP	AP
A	BP	BP	BP

Haciendo uso de la herramienta FUZZY de MATLAB se procede a configurar las entradas y salidas del sistema. En cada una se determina el nombre, el tipo, y el rango, que generalmente se asigna de 0 a 1.

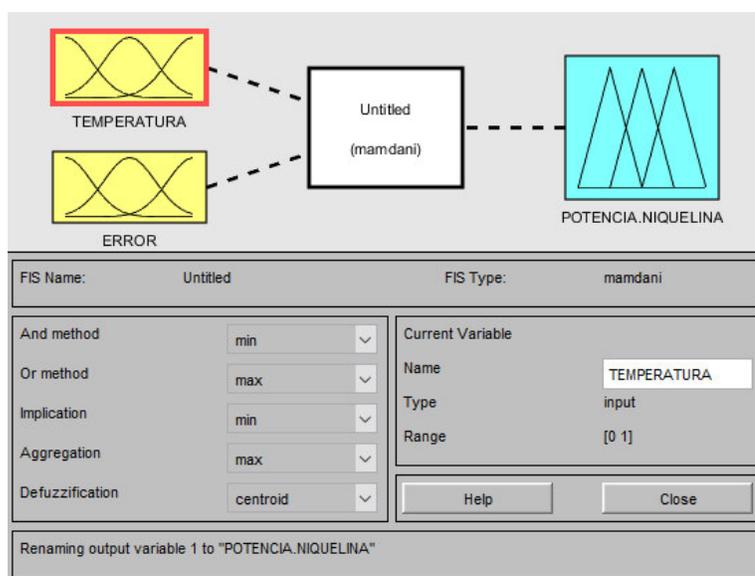


Figura 107 Configuración de entradas y salidas

Se configura las entradas TEMPERTURA Y ERROR y la salida POTENCIA.NIQUELINA. En esta configuración se asigna el nombre y los parámetros para las diferentes variables de estado.

Para la temperatura, con las etiquetas lingüísticas baja (B), normal (N) y alta (A).

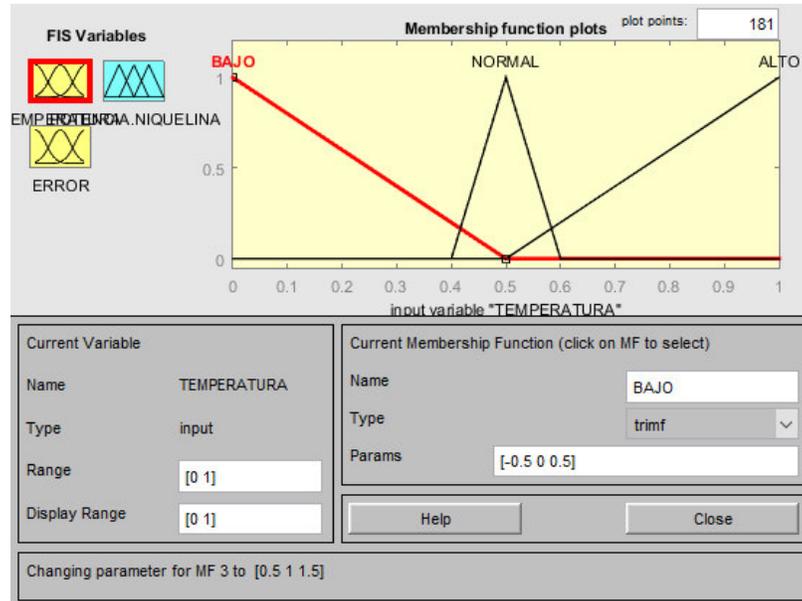


Figura 108 Rango temperatura BAJA

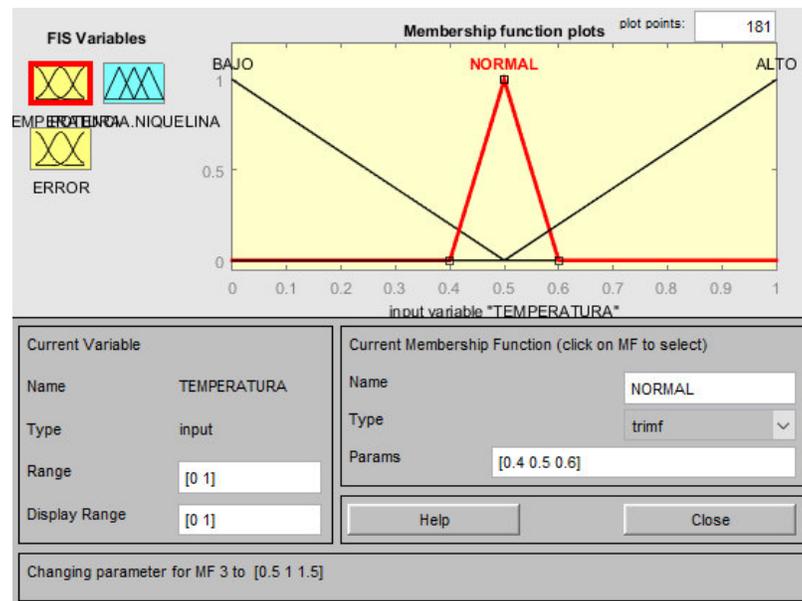


Figura 109 Rango temperatura NORMAL

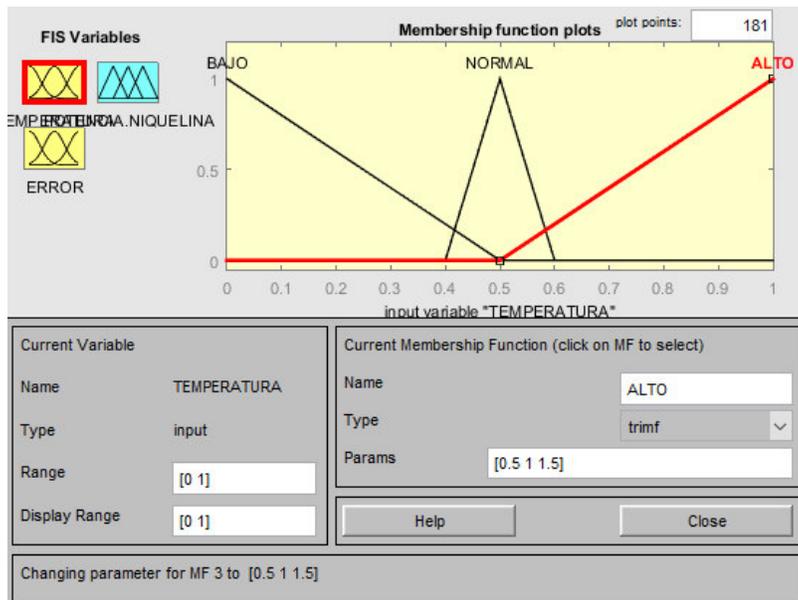


Figura 110 Rango temperatura ALTA

Para el error con las etiquetas lingüísticas: error bajo (EB), error medio (EM) y error alto (EA).

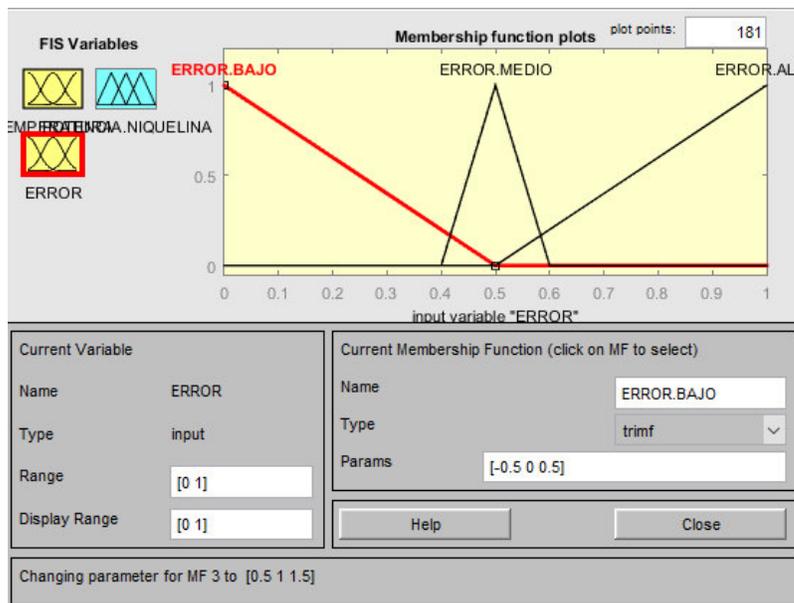


Figura 111 Rango error BAJO

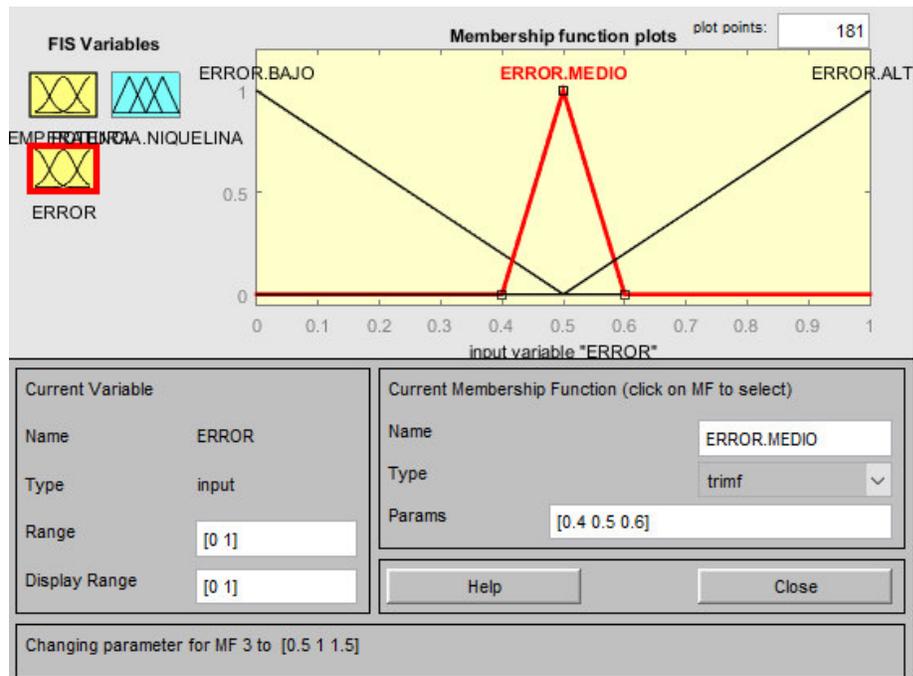


Figura 112 Rango error MEDIO

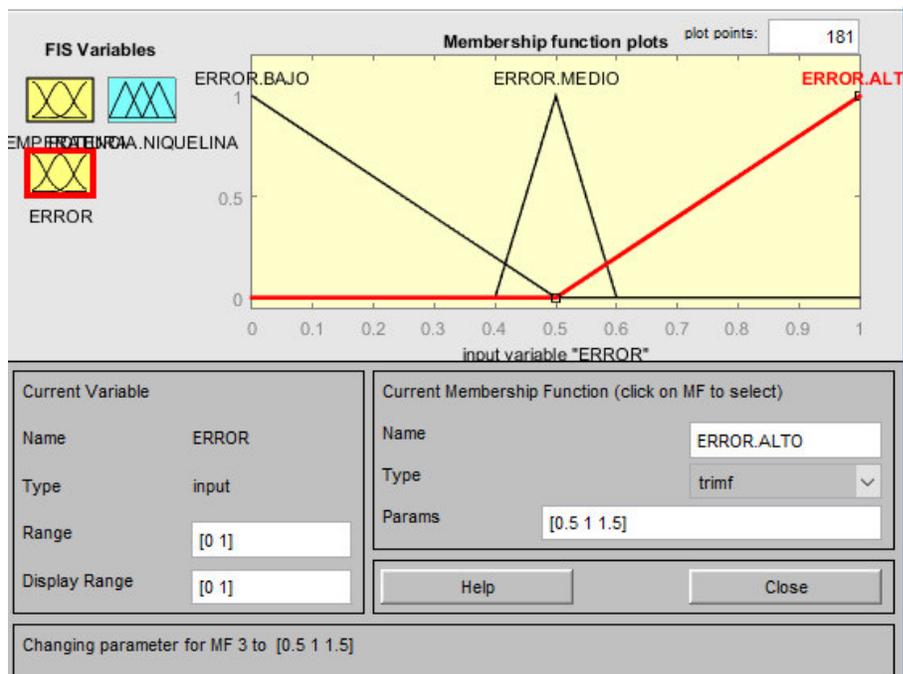


Figura 113 Rango error ALTO

Para la potencia de la niquelina con las etiquetas lingüísticas: baja potencia (BP), media potencia (MP) y alta potencia (AP).

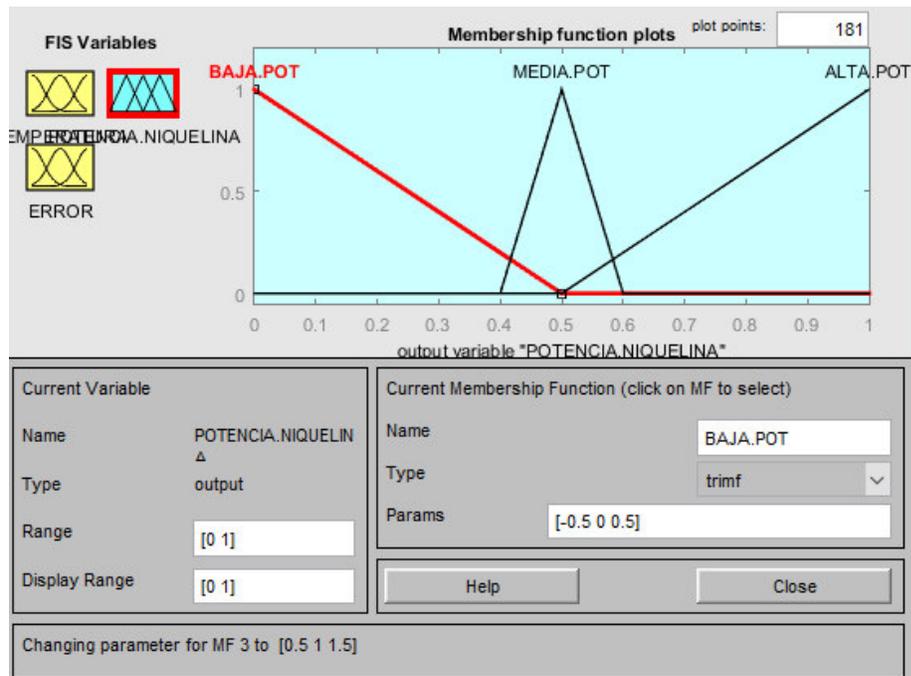


Figura 114 Rango potencia BAJA

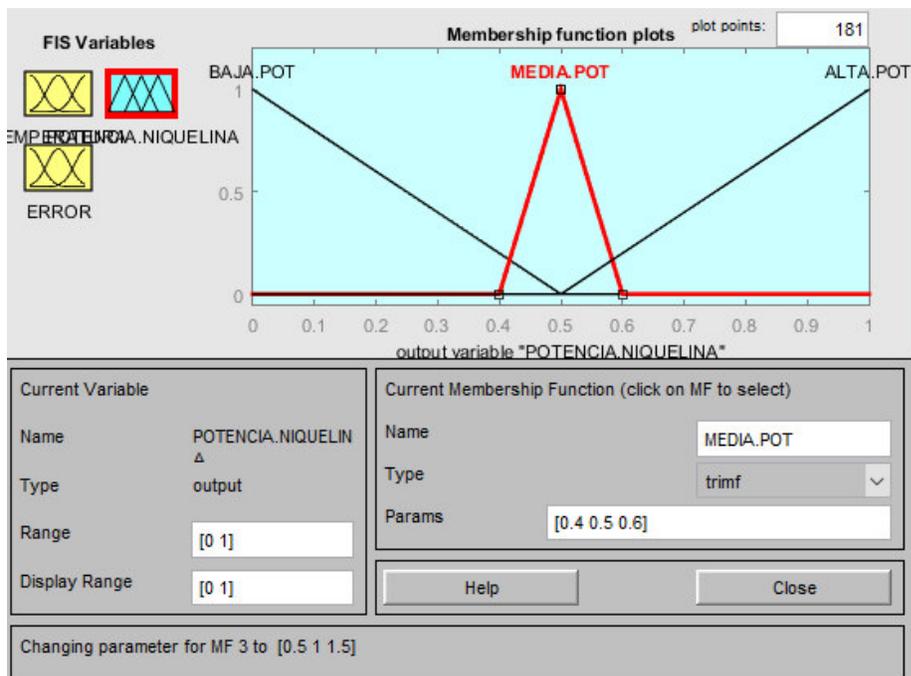


Figura 115 Rango potencia MEDIA

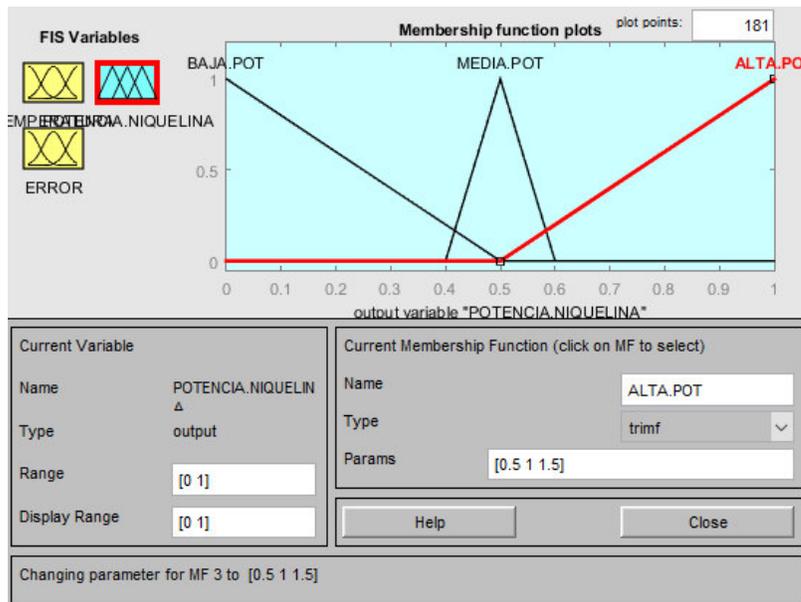


Figura 116 Rango potencia ALTA

Al tener configurado todas las variables de estado y de control se procede a programar las reglas. Para realizar la programación se guía de la matriz de variables.

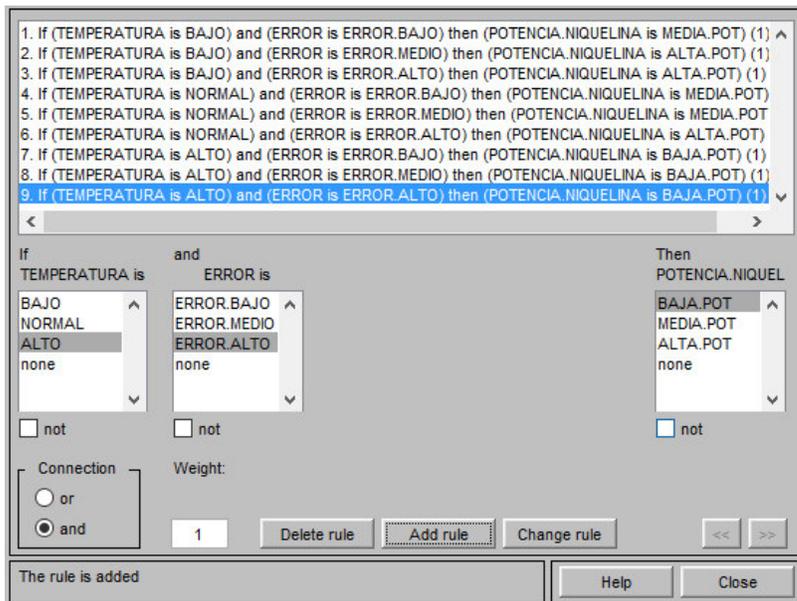


Figura 117 Programación reglas de control FUZZY

Finalmente, se puede observar de manera gráfica como se ejerce la relación, entre la temperatura, el error, y la potencia de la niquelina.

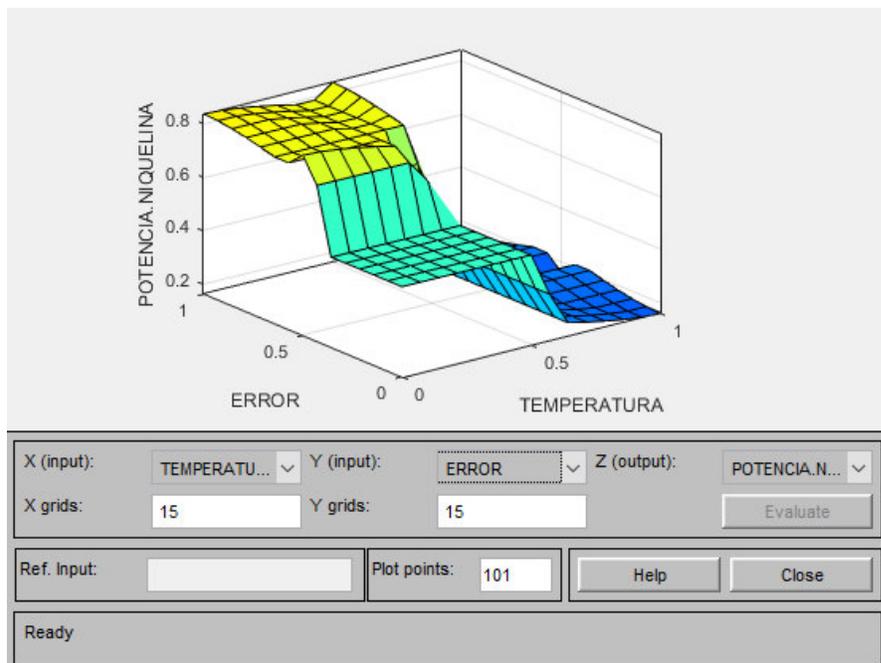


Figura 118 Relación temperatura-error-potencia.niquelina

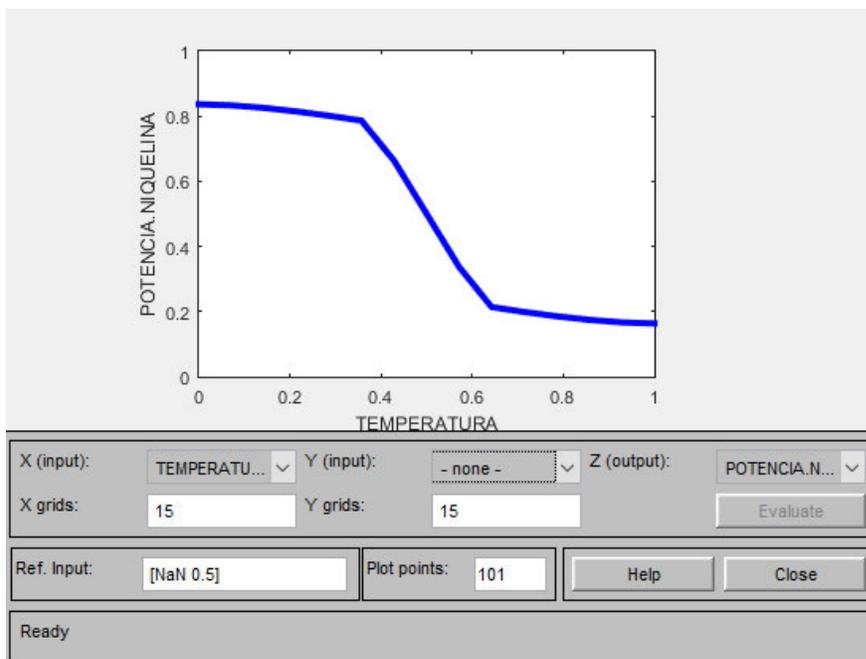


Figura 119 Relación temperatura-potencia.niquelina

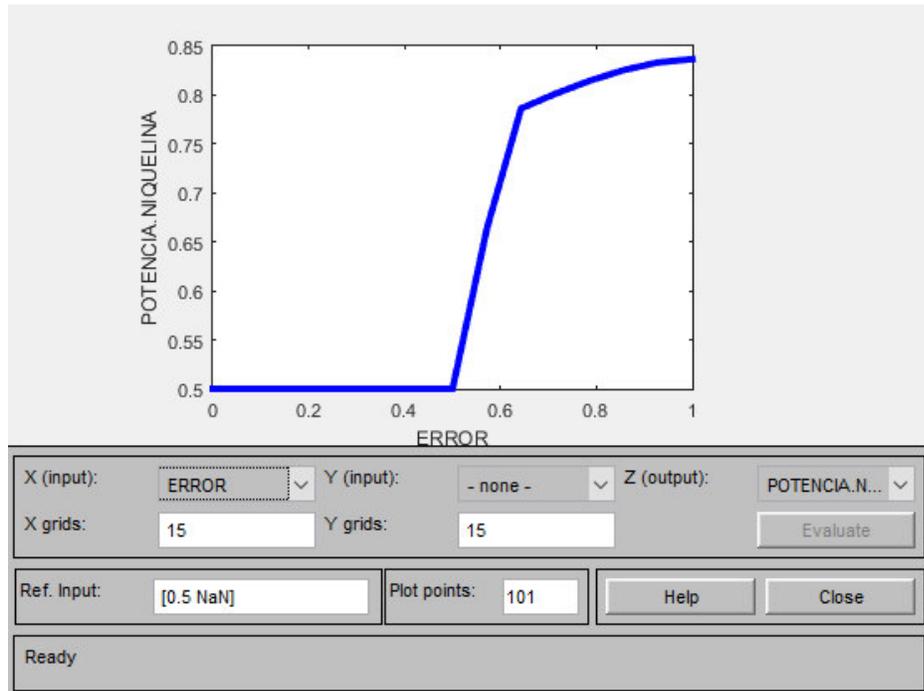


Figura 120 Relación error-potencia.niquelina

4.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

Para el diseño de la Interfaz Humano Máquina se utilizó la metodología propuesta por la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), se utiliza esta guía ya que está enfocada a ambientes industriales con salas de supervisión. Esta guía contiene un esquema en donde se indica los elementos de la interfaz, desde lo general a lo particular.

La guía indica que entre los parámetros a tomar en cuenta en primer lugar sean la arquitectura y navegación de la HMI y como se realizará la distribución de los elementos dentro de la misma. Posteriormente indica parámetros como el color, el texto, tablas, valores y comandos de ingreso.

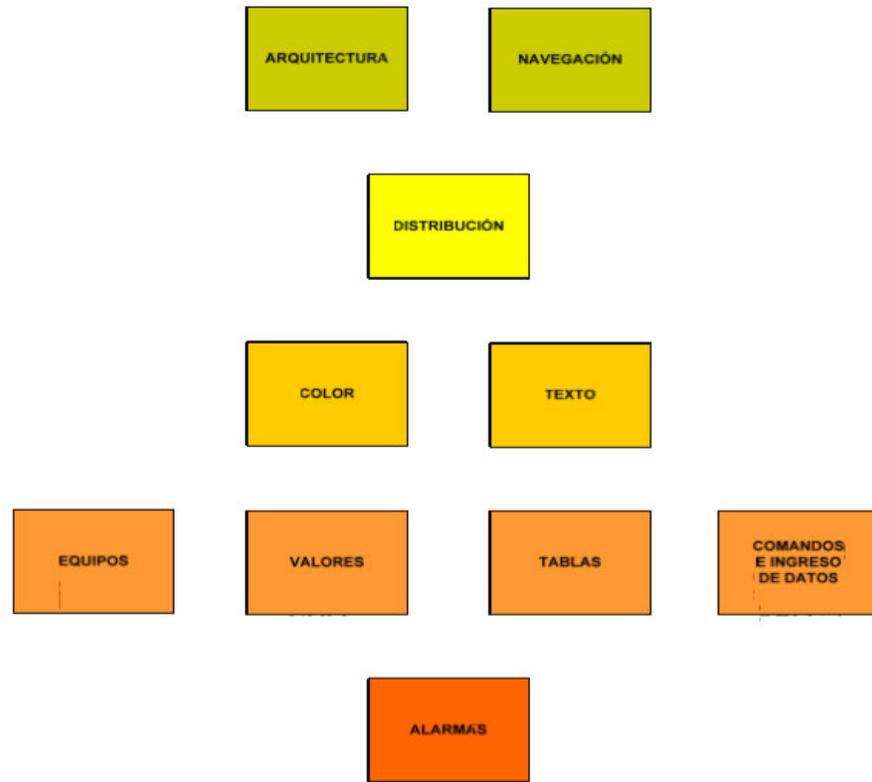


Figura 121 Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz

Fuente:(Ponsa, 2009)

Partiendo de este esquema se procede a diseñar la Interfaz Humano Máquina.

Se parte realizando la arquitectura de la HMI, en donde se define las diferentes pantallas con las que contará el usuario para interactuar con el sistema.

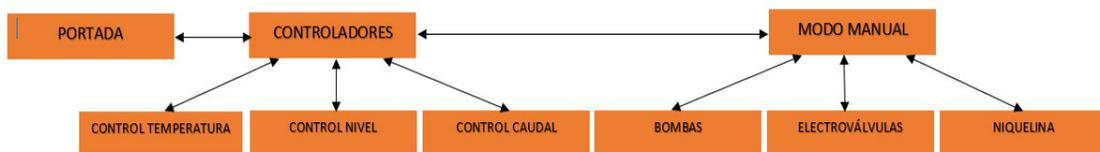


Figura 122 Arquitectura HMI

A continuación, se determina como va a navegar el operador dentro del sistema. Para realizar la navegación se toma en cuenta las pantallas definidas en la arquitectura de la HMI.

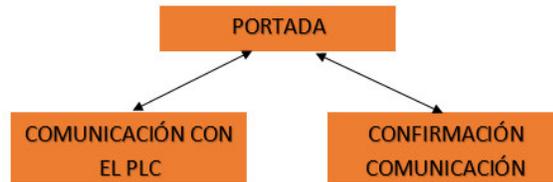


Figura 123 Navegación sección portada

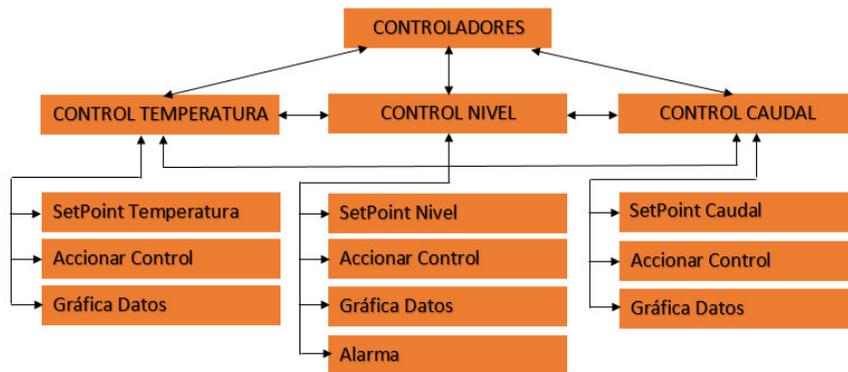


Figura 124 Navegación sección controladores

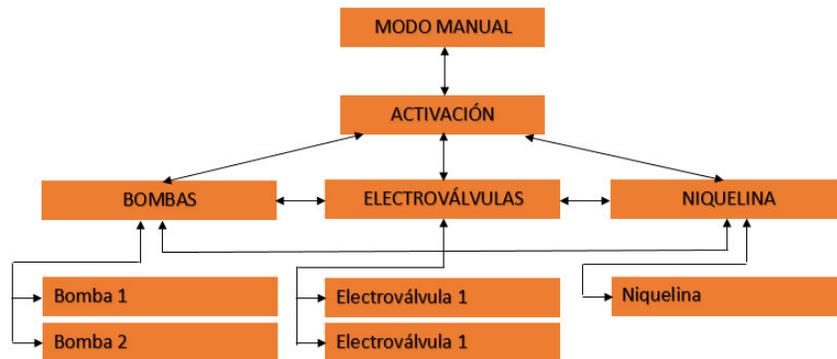


Figura 125 Navegación sección modo manual

Conociendo la arquitectura y la navegación de cada sección se diseña la HMI, tomando en cuenta los parámetros de la guía GEDIS. Para la sección de carátula se toma en cuenta la posición de las imágenes y los colores de los elementos. La guía describe que las imágenes de presentación deben ir en la

parte superior, de manera centrada, el fondo de pantalla de color beige, y el texto general de color azul marino.



Figura 126 HMI sección portada

Para la sección control temperatura, se toma en cuenta la posición de indicadores, botón de accionamiento y gráfica. La guía describe que el fondo de pantalla debe ser de color beige, el texto general de color azul marino, los indicadores de temperatura color marrón y el accionamiento color verde.

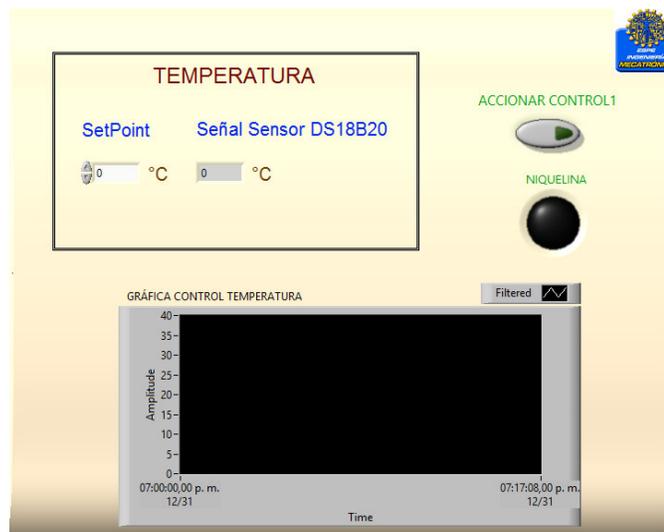


Figura 127 HMI sección control temperatura

Para la sección control nivel, se toma en cuenta la posición de indicadores, ingreso de las constantes del controlador, botón de accionamiento, gráfica y alerta de nivel máximo con su respectivo mensaje. La guía describe que el fondo de pantalla debe ser de color beige, el texto general de color azul marino, los indicadores de nivel color verde, el accionamiento color verde y la alarma crítica color rojo.

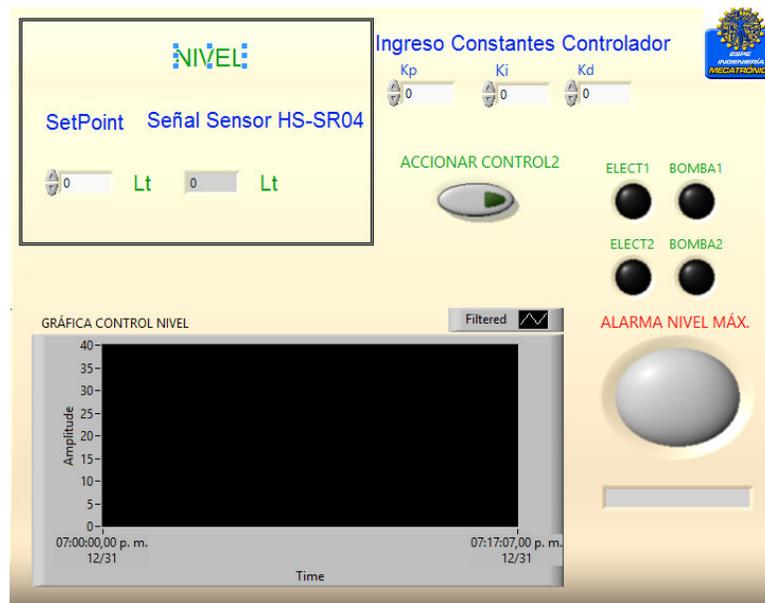


Figura 128 HMI sección control nivel

Para la sección control caudal, se toma en cuenta la posición de indicadores, ingreso de las constantes del controlador, botón de accionamiento y gráfica. La guía describe que el fondo de pantalla debe ser de color beige, el texto general de color azul marino, los indicadores de caudal color azul, y el accionamiento color verde.

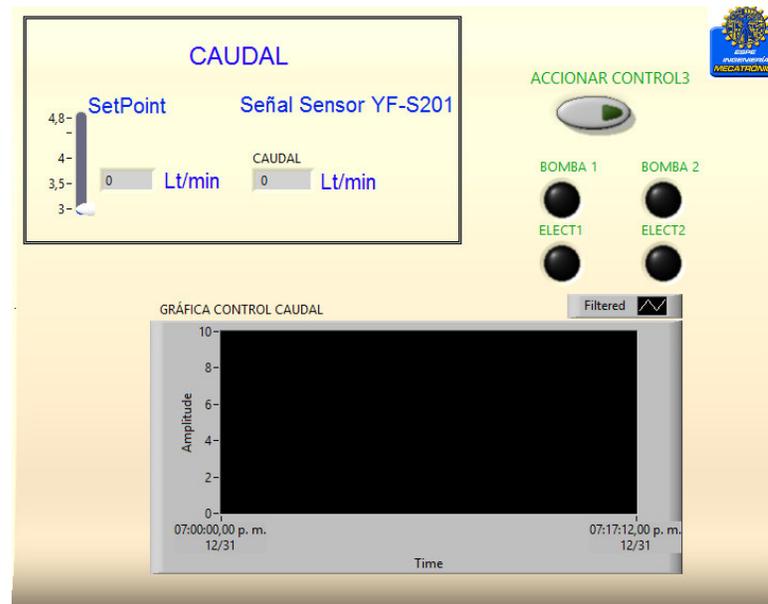


Figura 129 HMI sección control caudal

Para la sección modo manual, se toma en cuenta la posición de los botones de accionamiento. La guía describe que el fondo de pantalla debe ser de color beige, el texto general de color azul marino y el accionamiento color verde.

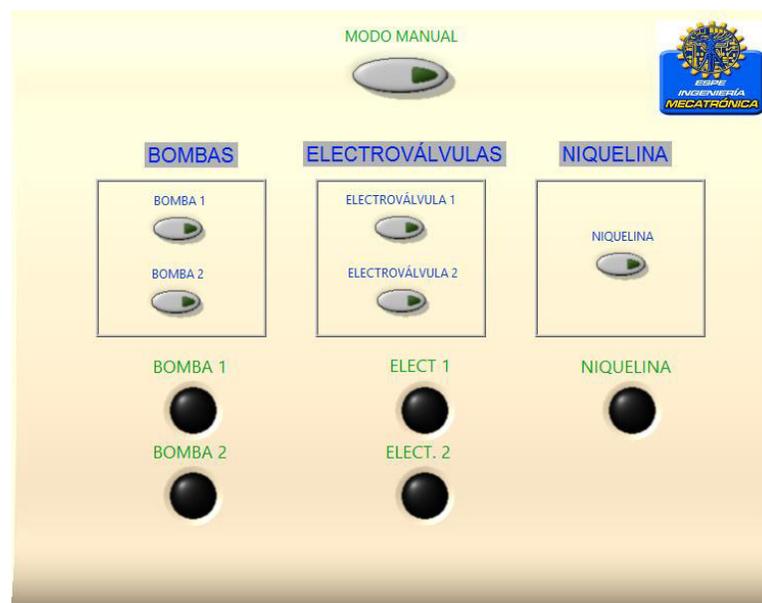


Figura 130 HMI sección modo manual

CAPÍTULO IV

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. PRUEBAS Y CORRECCIONES EN TANQUES DE AGUA Y TUBERÍAS

El sistema realizado de tanques y tuberías, es un sistema robusto ya que al llenar totalmente ambos tanques no se observaron deformaciones que puedan afectar la estructura.

Al realizar el transporte de líquido a través de la tubería no se observó ningún tipo de deformación, pero si una pequeña fuga de líquido en la conexión que acoplaba la salida de líquido del depósito con la bomba, motivo por el cual se procedió a volver a sellar con teflón y silicona cada uno de los acoples de esta parte de la tubería.

En la segunda prueba de transporte de líquido no se observó ninguna fuga en el sistema de tuberías implementado.

5.2. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Se realizó pruebas de continuidad en cada uno de los cables de alimentación eléctrica, además se hizo pruebas de funcionamiento tanto del botón de emergencia como del switch de encendido y apagado, comprobando voltajes con la ayuda de un multímetro, verificando de esta manera que la red eléctrica funcionaba correctamente.

5.3. PRUEBAS Y CORRECCIONES PANEL DE CONTROL

Se realizó pruebas de continuidad en cada uno de los pines del panel de control, para asegurar una correcta conexión entre los pines tanto de actuadores, sensores y PLC M-DUINO. También se realizó la corrección en la distribución de los pines debido a que se realizó el cambio de un sensor que necesitaba un pin adicional de los originalmente diseñados.

La rotulación de los pines del PLC M-DUINO fue rediseñada debido a que la originalmente implementada era de un tamaño muy reducido.

Se comprobó con la ayuda de un multímetro los voltajes en cada uno de los pines de alimentación de voltaje DC disponibles en el panel, comprobando que estos operaban correctamente. Al realizar un encendido directo de los actuadores del modular se comprobó que estos se encendían sin ningún problema.

5.4. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN DEL COMPUTADOR CON EL PLC M-DUINO

Se realizó la comunicación desde la computadora con el PLC-MDUINO a través del puerto desde el panel de control. En la computadora se observó que el dispositivo era reconocido sin ningún problema, pudiendo de esta manera realizar la programación.

Debido a que la tarjeta de adquisición de datos del PLC es un Arduino Mega 2560, en la computadora se reconoce al dispositivo con este nombre.

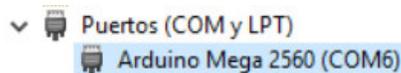


Figura 131 Reconocimiento del PLC como dispositivo

Además, en el software de programación IDE de Arduino se reconoce al PLC con este mismo nombre.

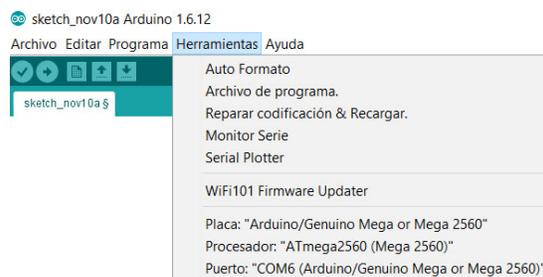


Figura 132 Reconocimiento del PLC en el IDE de Arduino

5.5. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR HC-SR04

Para realizar las pruebas de funcionamiento del sensor de nivel se implementó una regla en el depósito de líquido que nos permite medir los litros,

conforme se llena o vacía el tanque desde un valor mínimo de 0 de litros hasta un valor máximo de 40 litros, para poder realizar la toma de datos.

El sensor es de tipo digital y funciona en base al tiempo en que retorna el pulso en microsegundos, este tiempo es directamente proporcional a la distancia que se encuentre la superficie del líquido con respecto al sensor.

Para hallar la ecuación que me indicará los litros que hay en el tanque, se tomó los datos que se detallan a continuación:

Tabla 38
Datos del sensor HC-SR04

LITROS	TIEMPO (us)	LITROS	TIEMPO (us)	LITROS	TIEMPO (us)
0	3737	15	2776	30	1814
1	3673	16	2712	31	1750
2	3609	17	2647	32	1686
3	3545	18	2583	33	1622
4	3481	19	2519	34	1558
5	3417	20	2455	35	1494
6	3353	21	2391	36	1429
7	3288	22	2327	37	1365
8	3224	23	2263	38	1301
9	3160	24	2199	39	1237
10	3096	25	2135	40	1173
11	3032	26	2071		
12	2968	27	2006		
13	2904	28	1942		
14	2853	29	1878		

De los datos obtenidos se traza la gráfica de litros vs tiempo de respuesta.

LITROS VS TIEMPO DE RESPUESTA

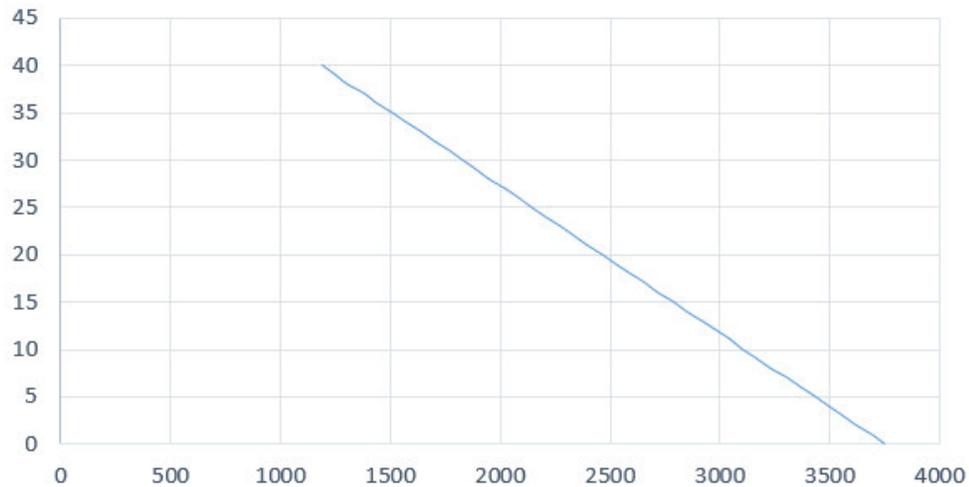


Figura 133 Respuesta del Sensor HC-SR04

Obteniéndose la siguiente ecuación del tipo lineal que nos permitirá medir el nivel del depósito en función de la cantidad de litros que haya en el mismo.

$$\text{VOLUMEN} = (-0.0156 * \text{TIEMPO}) + 58 \text{ [litros]}$$

5.6. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR YF-S201

Para la calibración del sensor de caudal se hizo uso de un cronómetro y de la regla indicadora de litros ubicada en el depósito en donde se observó la cantidad de pulsos que nos envía el sensor en un tiempo de 1 segundo, se obtuvo que un litro de agua se llenaba en un tiempo de 12 segundos con un pulso PWM de la bomba de 255 que es lo máximo que permite el controlador PLC M-DUINO. Realizando variaciones en el PWM de la bomba para obtener un rango de valores de un caudal de 0 litros por minuto hasta uno de 5 litros por minuto, se obtuvo los siguientes resultados que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 39
Datos del sensor YF-S201

CAUDAL(Lt/min)	PULSOS
0	0
0.5	8
1.0	12
1.5	20
2.0	25
2.5	32
3.0	38
3.5	43
4.0	48
4.5	55
5.0	62

De los datos obtenidos se traza la gráfica del caudal vs los pulsos generados por el sensor.

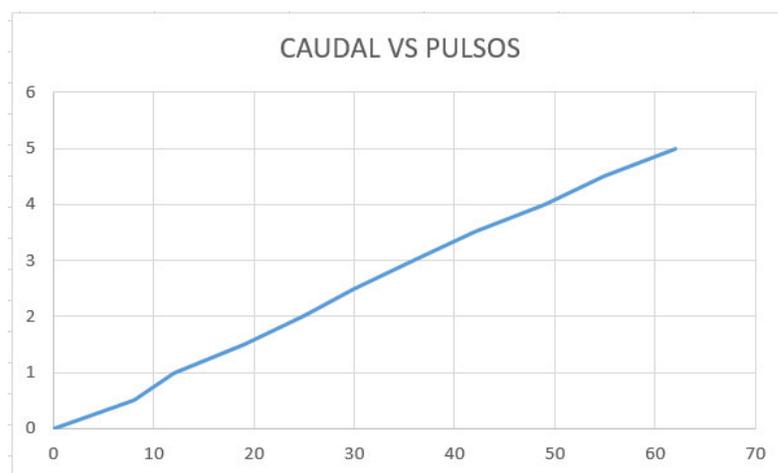


Figura 134 Respuesta del Sensor YF-S201

Obteniéndose la siguiente ecuación de tipo lineal que nos permitirá medir el caudal que circulará desde el reservorio de líquido hacia el depósito de líquido a través de las tuberías.

$$\text{CAUDAL} = 0.0833 * \text{PULSOS [Lt/min]}$$

5.7. PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR DB18B20

Para la calibración del sensor de temperatura se procedió a investigar su funcionamiento, encontrando librerías propias de Arduino que permiten leer la lectura de datos del sensor de manera directa, con una precisión muy alta, posteriormente se comprobó que la temperatura marcada por el sensor y la temperatura marcado por un termómetro eran iguales.

5.8. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS EN EL SISTEMA DE CONTROL

La programación del sistema de control realizada en el PLC consistió en la implementación de un código de programación para la adquisición de datos de los sensores y la programación de los controladores para las tres plantas, en donde se realizó pruebas de funcionamiento y regulación de los mismos para poder obtener la mejor respuesta.

Al realizar la comunicación con la HMI inicialmente se tenía un tiempo de respuesta de 7 segundos, entonces se procedió a disminuir los tiempos de procesamiento tanto del controlador como de la HMI obteniendo un tiempo de respuesta de 2 segundos.

Al realizar él envió de datos de la HMI al controlador se obtuvo un desfase en los mismos, por lo cual se tuvo que realizar la sincronización de los datos para poder realizar las acciones de control distribuidas en la HMI realizada.

5.9. PRUEBAS EN LOS FUSIBLES

Los fusibles se conectaron de manera que las bombas y la niquelina no funcionen en caso de que el fusible esté quemado. Los fusibles para las bombas fueron de 8A y para la niquelina de 20A.

5.10. GUÍAS DE LABORATORIO

	UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
	DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA	NRC	UNIDAD	PRÁCTICA No.	DURACIÓN
Ing. Mecatrónica			1	

TEMA

Adquisición de datos de los sensores y control ON-OFF de los actuadores del modular didáctico.

OBJETIVO

Familiarizar al estudiante con el funcionamiento de los diferentes actuadores y sensores que componen el modular didáctico a través del PLC M-DUINO.

FUNDAMENTO

- Que el alumno se familiarice y conozca el equipo y la forma de conexión.
- Aprender a utilizar correctamente los dispositivos.
- Conocer aplicaciones y usos del equipo, en ejemplos de la vida real mediante simulaciones.

MARCO TEÓRICO

ADQUISICIÓN DE DATOS

Se conoce como adquisición de datos al proceso de medir una señal eléctrica proveniente de algún elemento que genere la misma ante la variación de un estímulo físico esto se lo realiza comúnmente a través de una tarjeta de adquisición de datos.

CONTROL ON-OFF

Es una de las formas más simples de control por realimentación, dispone básicamente de dos estados en los cuales el actuador a controlar ocupa solo estas dos posibles posiciones, también es conocido como control todo-nada.

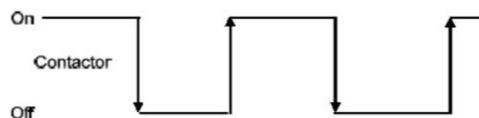


Figura 135 Señal

Fuente: (ELECTROPC, 2014)

BOMBAS HIDRÁULICAS

Son las encargadas del transporte de líquido a través de las tuberías.

ELECTROVÁLVULAS

Permiten el flujo de líquido a través de las tuberías del sistema.

NIQUELINA

Tienen la función de calentar el agua del reservorio de líquido.

SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20

Mide la temperatura a la que se encuentra el líquido del reservorio.

SENSOR DE NIVEL HC-SR04

Mide el nivel del líquido en el depósito.

SENSOR DE CAUDAL YF-S201

Mide el caudal que va desde el reservorio al depósito.

EQUIPO NECESARIO

- Computador con software: IDE de Arduino.
- Cables de Conexión.
- Destornillador plano pequeño.

PROCEDIMIENTO

1. Revisar el manual de uso y operación para poder familiarizarse con el equipo.
2. Energizar el equipo enchufando la toma general a una alimentación de 110V AC.
3. Verificar que las fuentes de alimentación disponibles en el panel de control estén funcionando correctamente.
4. Realizar el cableado de conexión en el panel de control y en el panel de circuitos de acondicionamiento para poder realizar la comunicación de los actuadores y sensores con el PLC M-DUINO.
5. Realizar en el IDE de Arduino un programa que permita realizar la adquisición de datos de los sensores, y otro que permita encender y apagar los actuadores del equipo a través de un control ON-OFF.

CUESTIONARIO

1. Indique mediante diagramas como realizó la conexión entre paneles y el PLC.
2. Indique los rangos de trabajo en los cuales pueden operar los sensores en el modular didáctico.
3. Describa el código de programación implementado.
4. Conclusiones y Recomendaciones

	UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
	DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA	NRC	UNIDAD	PRÁCTICA No.	DURACIÓN
Ing. Mecatrónica			2	

TEMA

Encontrar el modelo matemático de la planta de nivel del modular didáctico.

OBJETIVO

Realizar la modelación matemática de las plantas de nivel.

MARCO TEÓRICO

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SISTEMA

Para poder efectuar el análisis de un determinado sistema, se requiere de la obtención de un modelo matemático que pueda representar dicho sistema. Este modelo matemático equivale a una ecuación matemática o un conjunto de ellas que me pueda describir el comportamiento de un sistema.

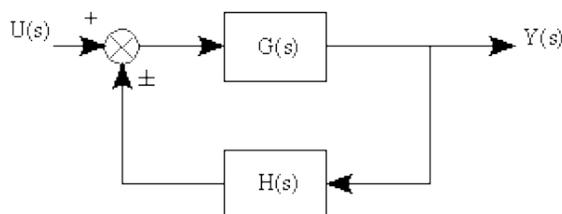


Figura 136 Lazo de control

Fuente: (Ogata, 2010)

Se debe saber que el modelo matemático que se puede realizar a partir de un sistema no necesariamente es único, sino que se pueden encontrar varias representaciones del mismo proceso.

Por lo general se emplea la representación en variables de estado o el método de relación entre entrada y salida.

PLANTA

Cualquier objeto físico que se desea ejercer una acción de control.

SISTEMA

Combinación de componentes que actúan en conjunto para realizar un determinado objetivo.

PROCESO

Secuencia de operaciones que llevan a un determinado resultado o fin.

EQUIPO NECESARIO

- Computador con los siguientes softwares: IDE de Arduino, Matlab con la librería IDENT.
- Cables de Conexión.
- Destornillador plano pequeño.

PROCEDIMIENTO

1. Determinar un tiempo de toma de datos que permita modelar de manera adecuada la planta
2. Realizar la adquisición de datos del sensor de nivel.
3. A través del uso del software matemático (MATLAB) realizar la modelación matemática de la planta a partir de los datos obtenidos previamente.
4. Analizar el comportamiento de cada una de las plantas encontradas.

CUESTIONARIO

1. Describa los elementos que conforman la planta de nivel.
2. Indique cómo modelo la planta de nivel y el resultado del mismo.
3. Realice un análisis de polos y ceros de la planta obtenida
4. Conclusiones y Recomendaciones

	UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
	DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA	NRC	UNIDAD	PRÁCTICA No.	DURACIÓN
Ing. Mecatrónica			3	

TEMA

Regulación y control de la planta nivel a través de un controlador y una HMI.

OBJETIVO

Realizar el modelamiento de un controlador para la planta de nivel.

Realizar una HMI que permita realizar el monitoreo y control del sistema.

MARCO TEÓRICO

En la actualidad se conocen los siguientes tipos de control que son usados comúnmente en diferentes sistemas industriales.

- Dos posiciones (ON-OFF)
- Proporcional (P)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p$$

- Proporcional Integral (PI)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s}$$

- Proporcional Derivativo (PD)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_d s$$

- Proporcional Integral Derivativo (PID)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$$

EQUIPO NECESARIO

- Computador con los siguientes softwares: IDE de Arduino, Matlab con la librería PIDTool, programa para realizar HMI de acuerdo al requerimiento del tutor de laboratorio.
- Cables de Conexión, destornillador plano pequeño.

PROCEDIMIENTO

1. Con el modelo matemático de la planta de nivel obtenido en la anterior práctica, seleccionar un tipo de controlador y realizar el modelamiento matemático del mismo, posteriormente verificar el controlador a través del uso del software matemático (MATLAB).
2. Seleccionar un software para la realización de la HMI y diseñarla de acuerdo al requerimiento del instructor a cargo.
3. Realizar el cableado de conexión para la comunicación de los actuadores y sensores con el PLC-MDUINO
4. Realizar la programación del controlador en el PLC M-DUINO.
5. Realizar pruebas de funcionamiento que integren el controlador programado con la HMI diseñada previamente.

CUESTIONARIO

1. Describa como se realizó el diseño del controlador y justifique.

2. Indique el diseño de la HMI realizada.
3. Indique el código de programación implementado en el PLC M-DUINO.
4. Conclusiones y Recomendaciones.

	UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
	DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA	NRC	UNIDAD	PRÁCTICA No.	DURACIÓN
Ing. Mecatrónica			4	

TEMA

Control de temperatura mediante un controlador FUZZY.

OBJETIVO

Realizar el control de temperatura a través de un controlador FUZZY programado en el PLC M-DUINO

MARCO TEÓRICO

CONTROLADOR FUZZY

También conocido como lógica difusa. Se basa básicamente en el comportamiento observado de la planta a controlar, en donde se toma en cuenta dos valores aleatorios, pero contextualizados y referidos entre sí. Una de las características de este tipo de control es que no se requiere hallar un modelo matemático del comportamiento de la planta.

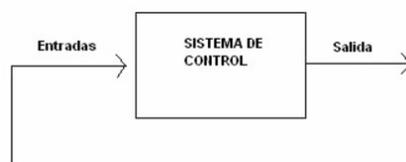


Figura 137 Control Fuzzy

Fuente: (ELECTROPC, 2014)

La característica principal de este tipo de controlador es su flexibilidad y su tolerancia a la imprecisión, así también se caracterizar por controlar sistemas que no son necesariamente lineales.

Las imposiciones de este tipo de controlador se pueden expresar mediante predicados que dan una idea de cómo se realizara la programación del control.

EQUIPO NECESARIO

- Computador con los siguientes softwares: IDE de Arduino, Matlab con la librería Fuzzy, programa para realizar HMI de acuerdo al requerimiento del tutor de laboratorio.
- Cables de Conexión.
- Destornillador plano pequeño.

PROCEDIMIENTO

1. Realizar el cableado de conexión entre la niquelina, el sensor de temperatura y el PLC M-DUINO para realizar la adquisición de datos y control de los mismos.
2. Realizar el diseño del control FUZZY de acuerdo a los requerimientos del encargado del laboratorio.
3. Realizar en el IDE de Arduino la programación de control FUZZY.
4. Probar el control seteando un valor de control en el controlador.

CUESTIONARIO

1. Describa las variables de estado y control usadas en su controlador.
2. Describa el código realizado para lo programación del PLC M-DUINO.
3. ¿Qué ventajas y desventajas tienen este tipo de controlador?
4. En que aplicaciones cree usted que es adecuado utilizar este tipo de control.
5. Conclusiones y Recomendaciones.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El modular didáctico fue diseñado y reconstruido de acuerdo a las especificaciones solicitadas por los encargados del laboratorio de Automatización Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- El diagnóstico inicial realizado nos permitió realizar el reemplazo de los componentes dañados, así como la reutilización de los componentes que se encontraban en buen estado.
- Se realizó un rediseño de los tanques permitiendo una adecuada distribución de las tuberías y las llaves manuales de desfogue de líquido.
- Se realizó un rediseño de las tuberías permitiendo un mejor acople entre los diferentes elementos que intervienen en el sistema, tales como bombas, electroválvulas, sensores etc.
- Se implementó un autómata programable basado en software libre, el cual puede ser usado en las prácticas de laboratorio con gran facilidad y robustez.
- El panel de control implementado en el modular didáctico permite al usuario poder conectar de una manera fácil y didáctica cada uno de los actuadores y sensores con el PLC-MDUINO, así como la programación de la tarjeta de adquisición de datos a través de un cable USB macho.
- La HMI realizada permitió la visualización de las diferentes variables que intervienen en el proceso de una manera numérica y gráfica en tiempo real, además permitió el control de los tres procesos que se realizaron en el modular didáctico.

- La frecuencia con la que la tarjeta de adquisición de datos del PLC-MDUINO envía los datos debe ser menor a la frecuencia con la que el software de control los lee, esto para lograr una adecuada sincronización en el envío y recepción de datos.

6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un reconocimiento de cada uno de los componentes del modular didáctico antes de realizar el uso del mismo.
- Durante el uso del equipo evitar derramar liquido sobre los diferentes componentes eléctricos que dispone. Se recomienda vigilar constantemente los niveles de agua en ambos tanques.
- Se debe vigilar el nivel de agua en el reservorio durante el uso de la niquelina, ya que si se enciende la misma cuando no está sumergida puede quemarse y dejar de funcionar.

BIBLIOGRAFÍA

- Acebes, L. F. (25 de 05 de 2012). Universidad de Valladolid. Obtenido de http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf
- Airtac. (s.f.). Solenoid Valve. Obtenido de <http://pdf.directindustry.es/pdf-en/airtac-automatic-industrial/3v2m-series-solenoid-valve/30479-673286.html#open>
- AliExpress. (s.f.). AliExpress. Obtenido de <http://es.aliexpress.com/item/Syscooling-130mm-acrylic-colours-water-tank-for-computer-water-cooling-pump/32559411929.html?spm=2114.10010408.0.38.bfdlut>
- CHIPS, M. (03 de 11 de 2015). MECATRONIUM CHIPS. Obtenido de <http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/>
- COOLMOD. (2001). COOLMOD.com. Obtenido de http://www.coolmod.com/caja-de-empalme-acoplador-cable-cat5-ethernet-utp-2x-hembra-rj45-precio?virtuemart_category_id=1941
- DALLAS. (12 de 01 de 2012). DALLAS SEMICONDUCTOR. Obtenido de <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>
- Dulhoste, J.-F. (2008). UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Obtenido de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I4_Medicion_de_nivel.pdf
- Electronics, T. (s.f.). Techmake Electronics.
- ELECTROPC. (2014). ELECTROPC Electrónica e Informática. Obtenido de http://electro-pc.cl/xcart/cart.php?target=product&product_id=184
- ELHINEL, A. (1999). ELHINEL. Obtenido de http://www.elhinel.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=1206&Itemid=516
- François, J. (2008). UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Obtenido de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I3_Medicion_de_presion.pdf
- González, S. R. (2011). Revista Española de Metrología. Obtenido de <http://www.emedida.com/documentos/Numero-7/presion-i>
- idePLAS. (s.f.). Ficha Tecnica Lamina PMMA(Acrylic). Obtenido de <http://www.ideplas.com/lamina-pmma.pdf>
- INTEGRAL, C. (2013). COMERCIO INTEGRAL. Obtenido de http://www.comerciointegral.com.ar/tanques_de_acero_inoxidable_1943.htm
- Karl-Heinz, J. (2001). IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Berlín: Springer-Verlag.

- Kouro, S. (2002). Universidad Técnica Federico Santa María. Obtenido de <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- Larrañaga, B. F. (1999). INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS. México: Alfa Omega Grupo Editorial.
- Leal, E. (2012). INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL. Obtenido de <https://instrumentacionunefm.files.wordpress.com/2012/05/sensores-de-presion.pdf>
- Mazzone, V. (Marzo de 2002). University of Newcastle Australia. Obtenido de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- MIKAI. (2006). MIKAI. Obtenido de <http://www.mikai.com.mx/inmersion.htm>
- NEWCASTLE, U. O. (13 de 04 de 2016). UNIVERSITY OF NEWCASTLE. Obtenido de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Novo, L. S. (s.f.). Departamento de Tecnología Electrónica Universidad de Vigo. Obtenido de <http://www.dte.uvigo.es/recursos/caudal/index.html>
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- PLASTIGAMA. (07 de 12 de 2013). PLASTIGAMA. Obtenido de http://www.plastigama.com.ec/pdfs/construccion/tanques_por_tipo.pdf
- Policarbonatos, A. y. (2015). Acrílicos y Policarbonatos. Obtenido de <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>
- Ponsa, P. (21 de 07 de 2009). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Obtenido de <http://www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/pantalla.pdf>
- Pública, S. N. (1998). Secretaria Nacional de la Administración Pública. Obtenido de <http://www.administracionpublica.gob.ec/importancia-del-software-libre-para-un-pais/>
- Sadiku, M. (2006). Fundamentos de circuitos eléctricos. México, D.F.: MCGRAW-HILL.
- Shields, I. (2016). INDUSTRIAL SHIELDS. Obtenido de <http://www.industrialshields.com/shop/m-duino-plc-arduino-42-i-os-analog-digital/>
- SHURFLO. (2011). Bomba de agua a presión. Data Sheet, págs. 1,2.
- Soriano, T. (2010). Universidad de El Salvador. Obtenido de https://expediente.ues.edu.sv/uiu/elementos_estudio/ciencias_naturales/fisica/hidro-dinamica/fluidos.pdf
- TECMAGA. (11 de 02 de 2015). TECMAGA mantenimiento integral. Obtenido de <http://www.tecmaga.com.mx/blog/febrero/tipos-de-tuberias.html>