



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y  
PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN  
MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS  
ARMADAS**

**AUTOR: CAROLINA JARRÍN, GANDHI CARVAJAL**

**DIRECTOR: ING MELTON TAPIA**

**CODIRECTOR: ING. DANNY SOTOMAYOR**

**SANGOLQUÍ, FEBRERO 2015**

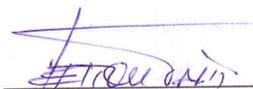
**CERTIFICADO DE LA ELABORAIÓN DEL PROYECTO**

Ing. Melton Tapia  
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Danny Sotomayor  
CODIRECTOR DE PROYECTO

**CERTIFICAN**

El proyecto titulado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR-DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS fue realizado en su totalidad por Ana Carolina Jarrín Mier y Gandhi Emanuel Carvajal Morales, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.



Ing. Melton Tapia  
DIRECTOR



Ing. Danny Sotomayor  
CODIRECTOR

Sangolquí, 2015-02-27  
**Sangolquí, 2015-02-27**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Ana Carolina Jarrín Mier

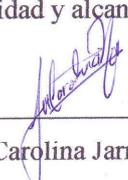
Gandhi Emanuel Carvajal Morales

**DECLARAMOS QUE:**

El proyecto de grado denominado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR-DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS, ha sido ejecutado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el texto desarrollado, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es nuestra autoría.

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

  
\_\_\_\_\_  
Ana Carolina Jarrín Mier

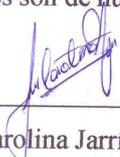
  
\_\_\_\_\_  
Gandhi Emanuel Carvajal Morales

**Sangolquí, 2015-02-27**

### **AUTORIZACIÓN**

Nosotros, Ana Carolina Jarrín Mier y  
Gandhi Emanuel Carvajal Morales

Autorizamos a la Universidad de las fuerzas armadas - ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR-DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

  
\_\_\_\_\_  
Ana Carolina Jarrín Mier

  
\_\_\_\_\_  
Gandhi Emanuel Carvajal Morales

**Sangolquí, 2015-02-27**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre, mi padre y mi hermano, por ser el pilar más importante, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mis abuelitos que se han preocupado por mí desde el momento en que llegué a este mundo, me han formado para saber cómo luchar y salir victoriosa ante las diversas adversidades de la vida.

A mi Abuelito Wladimir Jarrín y mi tío Wladi, sé que este momento hubiese sido tan especial para ellos como lo es para mí. A mi novio Rolando quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

A mi familia, mis tías y primos, que han compartido conmigo los momentos más felices de mi vida y que son incondicionales para mí.

**Ana Carolina Jarrín Mier**

Dedico el esfuerzo plasmado en este trabajo a Dios, quien esta presente en cada momento de mi existencia. A mi padre Napoleón, ejemplo de lucha, quien cada día me muestra el valor de existir y dejar en cada acción el reflejo de nuestro ser con alegría y energía positiva. A mi madre Mariana, la que me ha apoyado y ha creído en mi en todas las circunstancias y en cada paso que he dado, preocupándose siempre de mi bienestar, salud y felicidad. A mi hermanita Anahí, compañera de aventuras, juegos, alegrías y tristezas, quien es fuente de felicidad en mi vida.

**Gandhi Emanuel Carvajal Morales**

## AGRADECIMIENTO

*En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi MADRE Ana Lucia Mier, mi PADRE Ramiro Jarrín, y mi HERMANO, Ramiro Jarrín; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. También a mi compañero de tesis porque lo hemos logrado, a mi director y codirector de tesis quienes nos han ayudado en todo momento; por último agradezco a la ESPE por abrirme sus puertas y brindarme conocimientos y valores que permaneceran en mi toda mi vida.*

**Ana Carolina Jarrín Mier**

*Agradezco a Dios por permitirme despertar cada mañana. A mis padres por su ejemplo de lucha y perseverancia para afrontar los avatares de la vida con fortaleza y la mirada en el horizonte, demostrándome que para ser feliz lo necesario es el amor y la unión de la familia y lo demás vendrá por añadidura. A mi hermana por todos los consejos y apoyo incondicional.*

*A mis amigos de la Universidad, Nelson, Lucho, Cari, Alejo, Sebas, Christian, Alex, Chucho, Edgar y Anita por los momentos compartidos dentro y fuera de las aulas.*

*A mis familiares y amigos cercanos, quienes de una u otra manera me apoyaron para cumplir mi meta.*

**Gandhi Emanuel Carvajal Morales**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### Contenido

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
I.Introducción .....	xviii
II.Antecedentes.....	xviii
III.Justificación.....	xxii
IV.Alcance .....	xxiii
V.Objetivos .....	xxiii
CAPITULO 1 .....	1
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	1
1.1.CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO .....	1
1.1.1.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y SISTEMAS .....	1
1.1.2.DEFINICIÓN DE PARAMETROS FUNDAMENTALES .....	2
1.1.3.DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DIMENSIONALES .....	2
CAPITULO 2 .....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Descripción de Elementos.....	3
2.1.1. Sistema de depósitos, tuberías e instrumentos .....	3
2.1.2. Sensores .....	5
2.1.2.1. Sensor de Presión .....	5
2.1.2.2. Sensor de Caudal.....	7
2.1.2.3. Sensor de Nivel .....	8

2.1.2.4. Sensor de temperatura .....	8
2.2. Procesos Industriales .....	9
2.2.1. Aplicaciones del Equipo .....	9
2.2.2. Sistemas de dos Depósitos .....	10
2.2.3. Ventajas y Desventajas .....	11
CAPITULO 3 .....	12
DISEÑO DE LOS SISTEMAS MODULARES .....	12
3.1. Alternativas y Soluciones.....	12
3.1.1. Análisis de Posibles alternativas .....	12
3.1.2. Selección de las Soluciones .....	19
3.2. Sistema Mecánico .....	44
3.2.1. Análisis Cinemático del Sistema.....	44
3.2.2.Consideraciones Generales de Diseño .....	47
3.2.2.1. Sistema de Montaje Bastidor .....	48
3.2.2.2. Depósitos.....	48
3.2.2.3. Sistema de Tuberías e Instrumentación .....	48
3.2.2. Diseño del sistema de Distribución de Depósitos .....	49
3.2.4. Diseño General del Sistema de Tuberías e Instrumentación.....	50
3.2.5. Dimensionamiento y Selección de materiales de los Depósitos .....	63
3.2.6. Dimensión y Análisis Estático del Bastidor.....	72
3.2.6.1. Diseño y Planos del Banco Bastidor de Montaje Cad.....	72
3.3. Eléctrico/ Electrónico.....	77
3.3.1. Selección de Elementos.....	77
3.3.1.1. Dimensionamiento y Selección de Sensores y Actuadores.....	77
3.3.2. Instalaciones Eléctricas .....	86
3.4. Sistemas de control .....	92
3.4.1. Parámetros de control.....	93
3.4.2. Automatización .....	94
3.4.2.1.Obtención de Modelos Matemáticos.....	95
3.4.2.2. Programación y simulación de controladores .....	102
3.4.2.3. Instrumentación.....	107
3.4.3. Diseño del sistema de comunicación con las estaciones del proceso .....	107
3.4.3.1. Comunicación mediante la tarjeta arduino y el computador.....	108

3.4.3.2. Comunicación arduino-arduino.....	108
3.4.3.2. Pantalla de control.....	108
3.4.3.2.1. Librerías a utilizar .....	108
3.4.3.2.2. Diagrama de Flujo pantalla de control .....	110
3.4.3.2.3. Explicación del programa .....	111
3.4.4. Diseño del Paro de Emergencia .....	113
3.5. Enlace de los Sistemas .....	114
CAPITULO 4.....	115
4.1. Pruebas de funcionamiento .....	115
4.1.1. Calibración de sensores.....	115
4.1.2. Verificación y correcciones Sistema Mecánico .....	119
4.1.3. Verificación y correcciones Sistema Electrico/Electrónico.....	120
4.1.4. Verificación y correcciones del sistema de control.....	121
4.2. Análisis financiero .....	121
4.2.1. Antecedentes .....	121
CAPITULO 5.....	127
MANUAL DE USO Y OPERACIÓN .....	127
5.1. Guías para la realización de Practicas.....	127
5.1.1. Reconocimiento de los elementos que componen el módulo. ....	127
5.1.2. Regulación de nivel mediante control on-off y el uso del panel de control..	131
5.1.3. Encontrar la ecuación que gobierna el sistema de una planta de presión. ....	133
5.1.4. Elaborar un controlador para una planta de presión.....	135
5.1.5. Desarrollar un HMI para controlar la planta de presión. ....	137
5.2. Manual de Uso y Operación.....	139
CAPITULO 6.....	146
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	146
6.1. Conclusiones .....	146
6.2. Recomendaciones.....	147
Bibliografía .....	148

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estación de Control de Procesos Compacta .....	xx
Figura 2. Pantalla de Inicio, Estación Compacta .....	xxi
Figura 3. Sistema de Depósitos .....	4
Figura 4. Sistema de tuberías.....	4
Figura 5. Presiones existentes.....	6
Figura 6. Curva de Deformación .....	6
Figura 7. Esquema de como está construido el sensor de nivel que se coloca en el tanque .....	10
Figura 8. Control de tanques de Petróleo.....	10
Figura 9. Sistema de tanques acoplados .....	11
Figura 10. Análisis funcional módulo didactico – Nivel 0.....	12
Figura 11. Análisis funcional módulo didáctico - Nivel 1 .....	13
Figura 12. Análisis funcional módulo didáctico - Nivel 2 .....	14
Figura 13. Módulos funcionales del Módulodidáctico .....	15
Figura 14. Presostato .....	19
Figura 15. Funcionamiento de sensor de presion tipo membrana.....	20
Figura 16. Funcionamiento de sensor de nivel tipo turbina .....	21
Figura 17. Funcionamiento sensor de flujo tipo ultrasonico .....	21
Figura 18. Funcionamiento de pines de sensor ultrasónico de nivel .....	23
Figura 19. Funcionamiento sensor de nivel tipo flotador.....	24
Figura 20. Funcionamiento de un sensor de temperatura tipo PT100 .....	25
Figura 21. Funcionamiento de sensor de temperatura tipo termocupla.....	25
Figura 22. Arduino Mega 2560 .....	33
Figura 23. PLC.....	33
Figura 24. Bomba de Agua controlada por PWM.....	37
Figura 25. Valvula Proporcional .....	38
Figura 26. Electroválvula.....	39
Figura 27. Niquelina.....	39
Figura 28. Régimenes de flujo.....	45
Figura 29. Distribuciones típicas de velocidad .....	45
Figura 30. Diagrama P&ID .....	50
Figura 31. Codo de 90° .....	51
Figura 32. Unión universal.....	51
Figura 33. Unión sencilla .....	51
Figura 34. Neplo .....	52
Figura 35. Bushing.....	52
Figura 36. Válvula check .....	52
Figura 37. Válvula de pie .....	53
Figura 38. Electroválvula de acción directa.....	53
Figura 39. Diagrama de Moody .....	58
Figura 40. Tanque1-mallado .....	68
Figura 41. Tanque1-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1.....	68
Figura 42. Tanque1-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1 .....	69

Figura 43. Tanque1-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1	69
Figura 44. Tanque1-mallado	70
Figura 45. Tanque2-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1	70
Figura 46. Tanque2-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1	71
Figura 47. Tanque2-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1	71
Figura 48. Dimensiones base de la mesa	72
Figura 49. Dimensiones parte posterior bastidor	73
Figura 50. Dimensiones estructura para Tanque A	73
Figura 51. Ilustración 4 Dimensiones soporte para Sensor de Nivel	74
Figura 52. Bastidor de montaje	74
Figura 53. Mesa-mallado	75
Figura 54 mesa-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1	75
Figura 55 mesa-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1	76
Figura 56. Mesa-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1	76
Figura 57. Cálculo Base Tanque A	78
Figura 58. Bomba seleccionada	79
Figura 59. Placa de acondicionamiento de la señal para la Bomba principal	80
Figura 60. Electroválvula	80
Figura 61. Placa de acondicionamiento de Electrválvulas	81
Figura 62. Niquelina	81
Figura 63. Placa de acondicionamiento para activación de Niquelina	82
Figura 64. Especificaciones del sensor de presión	82
Figura 65. Sensor de Caudal	83
Figura 66. Pt100	84
Figura 67. Circuito de Acondicionamiento del sensor de temperatura	84
Figura 68. Microcontrolador Arduino Mega	85
Figura 69. Elementos del sistema Eléctrico/Electrónico	86
Figura 70. Cableado de señales	88
Figura 71. Placa de activación de niquelina	88
Figura 72. Placa de activacion Bomba principal	89
Figura 73. Placa de acondicionamiento sensor de temperatura	89
Figura 74. Placa de Reles de activación	90
Figura 75. Placa de control arduino	90
Figura 76. Esquema de circuito completo	91
Figura 77. Diagrama de Bloques del Sistema de control	92
Figura 78. Elementos del sistema de control	93
Figura 79. Inteligencia artificial vs. Participación físico humana	95
Figura 80. Presión vs. PWM	97
Figura 81. Ident, herramienta de identificación de sistemas	97
Figura 82. Import data, ident	98
Figura 83. Etorno de Ident	98
Figura 84. Process models, ident	99
Figura 85. Aproximación del Modelo de presión	99
Figura 86. Aproximación del Modelo de caudal	101
Figura 87. Diagrama de flujo, Control on-off de nivel	103

Figura 88. Diagrama de flujo, Control PI de Presión .....	104
Figura 89. Diagrama de flujo, Control I de caudal .....	105
Figura 90. Diagrama de flujo, Regulación de temperatura .....	106
Figura 91. Esquema de conexión para envío y recepción entre arduinos .....	108
Figura 92. Pantalla utilizada .....	109
Figura 93. Panel de control .....	109
Figura 94. Diagrama de flujo, pantalla de control .....	110
Figura 95. Pantalla principal.....	111
Figura 96. Pantalla de las variables.....	111
Figura 97. Pantalla activado Presión.....	112
Figura 98. Boton para inicio de control .....	112
Figura 99. Boton para parar los controles.....	112
Figura 100. Pantalla de temperatura.....	113
Figura 101. Diseño de Paro de emergencia .....	114
Figura 102. Esquema fuente de 12VDC .....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Combinaciones de lazos de regulación .....	xix
Tabla 2. Matriz morfológica Módulo 1 .....	16
Tabla 3. Matriz morfológica MODULO 2.....	17
Tabla 4. Matriz morfológica MODULO 3 .....	18
Tabla 5. Evaluación de criterios MÓDULO 1 .....	26
Tabla 6. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a Mayor precisión.....	27
Tabla 7. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento .....	27
Tabla 8. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo .....	28
Tabla 9. Conclusiones MODULO 1.....	28
Tabla 10. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a Mayor precisión.....	28
Tabla 11. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento .....	29
Tabla 12. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo .....	29
Tabla 13. Conclusiones MODULO 1 .....	29
Tabla 14. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a mayor precisión .....	30
Tabla 15. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento .....	30
Tabla 16. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo .....	30
Tabla 17. Conclusiones MODULO 1 .....	31
Tabla 18. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor precisión .....	31
Tabla 19. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento .....	31
Tabla 20. Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo .....	32
Tabla 21. Conclusiones MODULO 1 .....	32
Tabla 22. Evaluación criterios MODULO 1.....	35
Tabla 23. Evaluación soluciones MODULO 2 respecto a Velocidad de Transmisión.....	35
Tabla 24. Emluación soluciones MODULO 2 respecto a fácil mantenimiento .....	36
Tabla 25. Evaluación soluciones MODULO 2 respecto a menor costo .....	36

Tabla 26. Conclusiones MODULO 2 .....	36
Tabla 27.....	40
Tabla 28. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a Mayor eficiencia.....	41
Tabla 29. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a fácil mantenimiento .....	41
Tabla 30. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a menor costo .....	41
Tabla 31. Conclusiones MODULO 3 .....	42
Tabla 32. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a mayor eficiencia .....	42
Tabla 33. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a fácil mantenimiento .....	42
Tabla 34. Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a menor costo .....	43
Tabla 35. Conclusiones MODULO 3 .....	43
Tabla 36. Datos Número de Reynolds .....	47
Tabla 37. Rugosidad absoluta de materiales .....	57
Tabla 38. Valores del coeficiente K en pérdidas singulares .....	60
Tabla 39. Accesorios tramo 1.....	61
Tabla 40. Accesorios tramo 2.....	61
Tabla 41. Tabla de propiedades del acrílico.....	64
Tabla 42. Dimensiones Generales de los Tanques.....	66
Tabla 43. Dimensiones Tanque A.....	78
Tabla 44. Dimensiones tanque B .....	78
Tabla 45. Distribución de Señales.....	87
Tabla 46. Detalle de los Sensores Utilizados.....	107
Tabla 47. Datos de Calibración sensor de Nivel.....	116
Tabla 48. Datos de Calibración sensor de Caudal.....	117
Tabla 49. Datos de Calibración sensor de Presión.....	118
Tabla 50. Datos de Calibración sensor de Temperatura .....	119
Tabla 51. Costos directos 1-Bancadas 2 .....	122
Tabla 52. Costos directos- Tanques .....	122
Tabla 53. Costos Directos-Ingeniería.....	123
Tabla 54. Lista de Materiales-Sistema Mecánico .....	123
Tabla 55. Lista de Materiales - Sistema Eléctrico.....	124
Tabla 56. Costos Indirectos.....	126

## RESUMEN

El principal problema que se plantea con respecto a los líquidos es su almacenamiento y manejo en tanques destinados a este fin, en el presente documento se detalla el proceso de diseño y construcción del sistema modular didáctico para control de presión, caudal y nivel, además se incluye el proceso de regulación de temperatura. Partiendo de las propiedades físicas del agua como fluido de trabajo, se diseñan los tanques, la bancada y se seleccionan los instrumentos de medición y actuadores del sistema modular utilizando el análisis funcional, en el que se discriminan las diferentes opciones para seleccionar los sensores y actuadores para realizar la regulación de las cuatro variables. Partiendo de cálculos y el uso de herramientas de diseño se obtienen los modelos matemáticos y se diseñan los controladores para los cuatro procesos de regulación. La programación se realiza en la tarjeta arduino mega 2560, y se utilizan tarjetas con circuitos impresos para realizar la adecuación de señales de sensores y actuadores, para el control de los procesos se utiliza un sistema HMI (Interfaz hombre máquina) con la utilización de un arduino mega 2560 y una pantalla tft-lcd (pantalla de cristal líquido de transistores de película fina).

### **PALABRAS CLAVES:**

- TANQUES DE ALMACENAMIENTO
- TARJETA ARDUINO
- TFT (PANTALLA DE TRANSISTORES)
- SENSORES
- BOMBA CONTROLADA POR PWM

## **ABSTRACT**

The main problem that arises with respect to liquids is their storage and handling in tanks intended for this purpose, in this paper the design process and construction of modular training system to control pressure, flow and level is detailed further includes the process of temperature regulation. Based on the physical properties of water as the working fluid, the tanks and the bed are designed, and measuring instruments and actuators are selected, using modular functional analysis in which the options are discriminated to select sensors and actuators for regulation of the four variables. Based on calculations and the use of design tools, the mathematical models are obtained and controllers are designed for the four regulatory processes. Programming is done in the mega arduino board 2560, and printed circuits are used for the adequacy of signals from sensors and actuators for process control. HMI system (Human machine interface) is used with the use of a arduino mega 2560 and tft-lcd display (liquid crystal display thin film transistor).

### **KEYWORDS:**

- STORAGE TANKS
- ARDUINO BOARD
- TFT
- SENSORS
- PWM- CONTROLLED PUMP

## **I. Introducción**

El principal problema que se plantea con respecto a los líquidos es el almacenamiento como paso previo o posterior a un proceso de producción.

Normalmente este proceso se realiza en los denominados “tanques de almacenamiento”, de ahí la importancia de una guía que nos dé una visión general de estos recipientes, su control y su optimización.

Una causa de accidentes de tanques es lo que se llama falsa operación, que consiste en abrir válvulas equivocadas, derrames, uso impropio de técnicas de limpieza y reparación del tanque.

Por esta razón se propone la construcción de un sistema modular que maneja las variables: presión, caudal, nivel y temperatura en un tanque, las cuales son de vital importancia en los sistemas automáticos de producción en la industria.

Este módulo al ser implementado para realizar prácticas en el laboratorio de Automatización Mecatrónica, permitirá simular ambientes reales de la industria y poder resolver los problemas relacionados de manera profesional.

## **II. Antecedentes**

La técnica de procesos alberga una gran cantidad de procedimientos diferentes y dependiendo de estos procedimientos se pueden analizar diferentes sistemas por ejemplo, los principios de funcionamiento sencillos de los procesos de tratamiento de aguas, la fabricación de alimentos y, además, técnicas sumamente complejas como los procesos biotécnicos.

El principal problema que se plantea con respecto a los líquidos es su almacenamiento como paso previo o posterior a un proceso de producción; el manejo de un líquido, desde y hasta un tanque de almacenamiento, es un proceso que involucra las técnicas de control y regulación básicas.

Es aquí donde interviene el sistema modular didáctico para el control de presión caudal y nivel, como parte de la enseñanza de las técnicas de automatización industrial.

De la Estación de Control de Procesos Compacta, diseñada por FESTO Didactic, se analizan las posibilidades de regulación con las variables involucradas, se incluye además la variable temperatura como un aporte al sistema modular.

- Control de nivel continuo mediante señal analógica.
- Control continuo de caudal con una bomba como sistema controlado y señal de pulsos (frecuencia) del estado del sistema.
- Control continuo de presión con una bomba como sistema controlado y señal de tensión del estado del sistema.
- Control de temperatura de dos puntos con una señal analógica de estado del sistema.

Las funciones de cada lazo de regulación dependen de las diferentes combinaciones de elementos así como del sistema de control y de su parametrización, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Combinaciones de lazos de regulación

<b>Control</b>	<b>Nivel</b>	<b>Presión</b>	<b>Caudal</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Nivel</b>	-	No	No	Sí
<b>Presión</b>	No	-	No	Sí
<b>Caudal</b>	No	No	-	Sí
<b>Temperatura</b>	Sí	Sí	Sí	-

(FESTO, 2007)

El Sistema de Control de Procesos Compacta de Festo Didactic, permite trabajar con cuatro tipos de regulación, estas cuatro posibilidades y sus posibles combinaciones dependen de elementos de vigilancia y mando, los componentes más destacados de esta estación son:

- Bomba centrífuga con control de velocidad analógico.
- Válvula neumática industrial.
- Detección de nivel analógico mediante ultrasonidos (corriente).
- Electroválvula proporcional.

- Sensores de nivel electrónicos (capacitivos) y de contacto (flotador).
- Sensor de caudal analógico (frecuencia).
- Sensor de presión analógico (tensión).
- Sensor de temperatura (PT100).
- Módulos de acondicionamiento de señal.
- Válvulas de accionamiento manual.

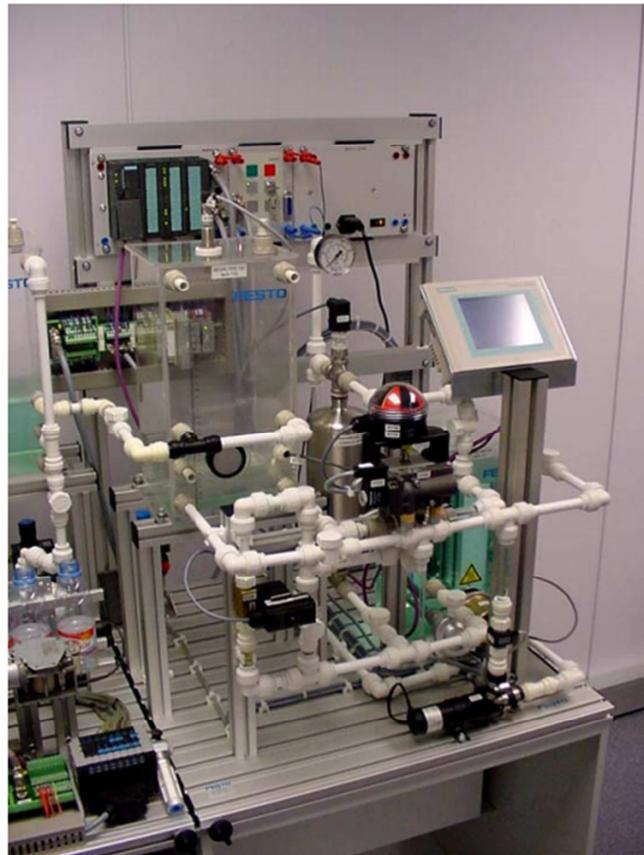


Figura 1. Estación de Control de Procesos Compacta

(FESTO, 2007)

Este sistema es comandado mediante la utilización de un Panel TP270 de Siemens, que es una pantalla LCD de 5,7" táctil. El panel está conectado al autómatas Siemens S7-300, mediante una conexión de tipo RS485 (Profibus). Si la conexión es correcta, al

poner la máquina en tensión, transcurridos unos segundos, durante los cuales el Panel realiza sus chequeos internos, aparece la siguiente pantalla de inicio de sistema.

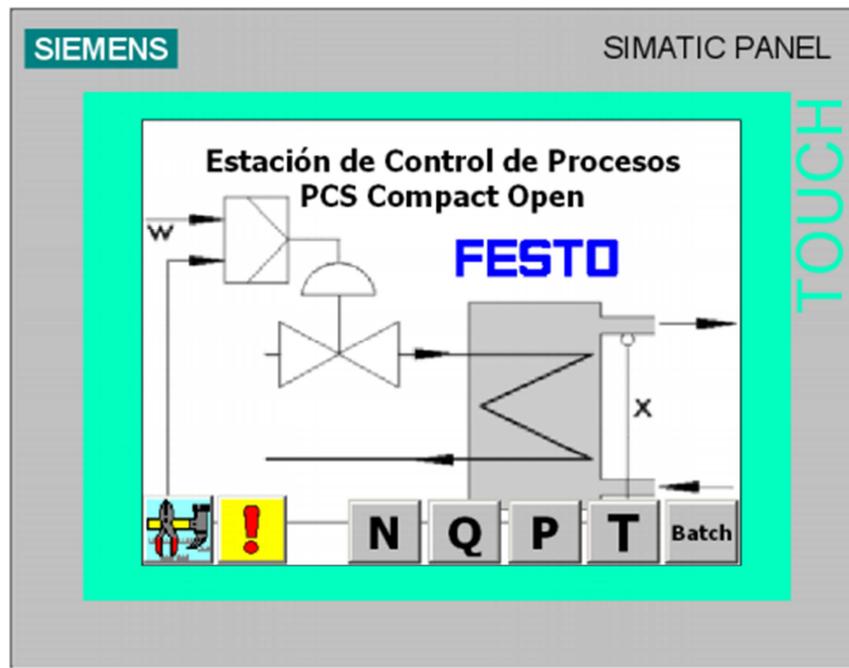


Figura 2. Pantalla de Inicio, Estación Compacta

(FESTO, 2007)

El Panel de Operador permite que el usuario pueda manejar la máquina con órdenes sencillas y, al mismo tiempo, poder supervisar el estado de la misma. Esto es una variante de un sistema SCADA, solo que a menor escala, y que entra dentro del concepto de HMI (Human Machine Interface, Interfaz Hombre Máquina).

En el caso de la estación de Festo, se podrán realizar tareas básicas de mantenimiento y mando, y visualizar el estado de las diferentes variables de proceso a través de la pantalla. De estos datos se destaca la necesidad de utilizar elementos de vigilancia y mando que permitan realizar los diferentes tipos de regulación que se plantean para el sistema modular didáctico para control de caudal, nivel y presión; además la utilización de un panel de control para manejar la máquina con órdenes sencillas y monitorear el desarrollo del proceso de regulación, el protocolo de comunicación entre el panel de

control y el autómata que controla la máquina debe cubrir a las necesidades de envío y recepción de datos para la regulación y supervisión.

### **III. Justificación**

La dirección que toma el Laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la Escuela Politécnica del Ejército, en lo que tiene que ver con el mejoramiento del laboratorio, por medio de la adquisición o implementación de nuevos equipos, los cuales al ser debidamente utilizados en la realización de nuevas prácticas, en diferentes áreas de la ingeniería (neumática, electro neumática, control, programación, etc.) permitirán una mejor formación práctica de los futuros profesionales; por otra parte permite la aplicabilidad de la Ley Orgánica de Educación Superior (LOES), según el artículo 93 que está vigente en el Ecuador desde el 12 de octubre de 2010, “El principio de calidad consiste en la búsqueda constante y sistemática de la excelencia, la pertinencia, producción óptima, transmisión del conocimiento y desarrollo del pensamiento mediante la autocrítica, la crítica externa y el mejoramiento permanente”.

De acuerdo al Art. 94, que “La Evaluación de la Calidad es el proceso para determinar las condiciones de la institución, carrera o programa académico, mediante la recopilación sistemática de datos cuantitativos y cualitativos que permitan emitir un juicio o diagnóstico, analizando sus componentes, funciones, procesos, a fin de que sus resultados sirvan para reformar y mejorar el programa de estudios, carrera o institución. Con lo que podemos ver que una inversión en el mejoramiento en equipos y procesos del laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la ESPE, se alinea a los objetivos de la calidad y ayuda a mejorar las condiciones en que se encuentra para su evaluación y mejora las condiciones que puede mostrar la carrera de Ingeniería Mecatrónica con procesos y equipos modernos y completamente funcionales.

Después de analizar las necesidades del laboratorio se toma como iniciativa el desarrollo del proyecto el cual busca diseñar e implementar un sistema modular didáctico que permita involucrarse con el ámbito industrial, generando un control de diferentes variables importantes, como: presión, caudal y nivel, además que genere un

sistema de alertas necesarios en un proceso industrial mediante la utilización de sensores, actuadores, y controladores.

#### **IV. Alcance**

El sistema modular didáctico para control de presión, caudal y nivel, permite al usuario involucrarse en un ambiente industrial simulado, realizando cuatro tipos de regulación:

- Control de nivel continuo mediante señal analógica.
- Control continuo de caudal con una bomba como sistema controlado y señal de frecuencia del estado del sistema.
- Control continuo de presión con una bomba como sistema controlado y señal de tensión del estado del sistema.
- Monitoreo y regulación de temperatura con una señal analógica de estado del sistema.

Los componentes necesarios para realizar estos cuatro tipos de regulación son:

- Bomba con control de ciclo de trabajo PWM.
- Detección de nivel analógico mediante sensor ultrasónico.
- Electroválvulas.
- Sensor de caudal analógico.
- Sensor de presión analógico.
- Sensor de temperatura (PT100).
- Placas de circuitos impresos para acondicionamiento de señal.

El usuario maneja el sistema modular mediante la utilización de un panel control, mediante el cual se realizan las tareas de mando y monitoreo del proceso de regulación

#### **V. Objetivos**

##### ➤ Objetivo General

- Diseñar y construir un sistema modular didáctico para regular nivel, caudal, presión y temperatura de agua entre dos depósitos, mediante la interacción de los sistemas: mecánico, eléctrico, electrónico, hidráulico y de control, para la realización de

prácticas en el Laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

➤ **Objetivos Específicos**

- Diseñar e implementar los sistemas: mecánico, eléctrico, electrónico, hidráulico y de control mediante técnicas y métodos de análisis para ingeniería junto con el apoyo de software de diseño, cumpliendo con normas nacionales e internacionales para el correcto funcionamiento del sistema modular didáctico.
- Dimensionar y seleccionar los distintos sensores (caudal, nivel, presión y temperatura), actuadores (bomba, válvulas, niquelina) y alarmas necesarios para la construcción de la estación.
- Proporcionar flexibilidad al sistema mediante el desarrollo de diferentes procesos de regulación, los que permitirán la realización de distintas prácticas de laboratorio y la posibilidad de formar parte de otros sistemas modulares.
- Realizar el manual de uso y mantenimiento y las guías de laboratorio que permitan a los usuarios conocer las diferentes aplicaciones que se le pueden dar al equipo, y a la vez, obtener el mayor beneficio y durabilidad del mismo.

## CAPITULO 1

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

#### 1.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

##### 1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y SISTEMAS

El sistema modular-didáctico para control de nivel, caudal y presión, consta de dos depósitos para líquido, en los cuales se va a realizar el control de las variables antes mencionadas. El líquido pasa del tanque A al tanque B a caudal y presión constantemente monitoreadas y controladas; en el tanque B se monitorea y controla el nivel de líquido además existe una alarma de temperatura la cual indica que el líquido alcanzó la temperatura indicada luego de terminar el ciclo de calentamiento del líquido.

El sistema modular se divide en los siguientes subsistemas:

- Sistema Mecánico
- Sistema Eléctrico/Electrónico
- Sistema de Control

El **Sistema Mecánico** comprende: el sistema de tuberías, bastidor de montaje y ubicación de componentes, tanques.

El **Sistema Eléctrico/Electrónico**: sensores y actuadores, panel de control, caja de señales.

El **Sistema de Control**: Instrumentación, algoritmos de control y comunicación.

Los tres sistemas trabajan sinérgicamente logrando controlar el sistema de manera automática.

### 1.1.2 DEFINICIÓN DE PARAMETROS FUNDAMENTALES

El Sistema Modular Didáctico para Control de Nivel, Caudal y Presión, utiliza como fluido de trabajo el agua; por lo que se toma en cuenta sus principales características:

- Densidad  $1 \text{ g/cm}^3$  a  $4^\circ\text{C}$ .
- Punto de fusión:  $0^\circ\text{C}$ .
- Punto de ebullición:  $100^\circ\text{C}$ .
- Constante dieléctrica: 78,3.
- $\text{Ph}=7$
- Conductividad eléctrica muy baja y Resistividad muy alta.

La temperatura ambiente en el Laboratorio de Automatización y Control se considera como  $20^\circ\text{C}$  y la temperatura de ebullición del agua en Sangolquí es de  $91^\circ\text{C}$ ; con estas consideraciones se establece el rango de temperatura para trabajo entre los  $20^\circ$  y los  $90^\circ$  centígrados

### 1.1.3 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DIMENSIONALES

Para iniciar el proceso de construcción del Sistema Modular Didáctico se deben considerar los siguientes requerimientos dimensionales:

- Rango de medición de nivel.
- Volumen de control.
- Dimensiones del tanque de control y el tanque de almacenamiento.
- Diámetro de la tubería.
- Dimensiones del bastidor de montaje.

El sensor ultrasónico, utilizado para la medición de nivel, tiene un rango de 2cm a 2m, la señal ultrasónica va a rebotar en el espejo de agua por lo que se considera un área de trabajo para evitar errores en el proceso, el área considerada es de 30 cm x 30 cm, para el tanque de control de forma prismática, se propone una altura del tanque de 60 cm, el desfogue del tanque se ubica a 5 cm de altura y el ingreso de la tubería a 55 cm de

altura medidos desde la base, con esto se considera un rango de medición de nivel de 45 cm.

Con estos datos se puede calcular que el volumen de control será de  $30 \times 30 \times 45 \text{ cm}^3$  es decir 40,5 litros.

El tanque de almacenamiento debe tener mayor capacidad que el tanque de control, por lo que se imponen las dimensiones de éste: 50 cm x 50 cm x 30 cm, el ingreso de la tubería se encuentra a 25 cm de altura y la salida de la tubería a 5 cm medidos desde la base del tanque, con lo que se obtiene un volumen útil de  $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$  es decir 50 litros.

A partir de las dimensiones de los tanques y el volumen de trabajo, se dimensionan los elementos de control e instrumentación, actuadores y sensores, por la disponibilidad en el mercado se utiliza tubería de 1/2".

Para el dimensionamiento del bastidor de montaje se considera la ergonomía del mismo, el área de trabajo donde se ubican los tanques es de 1200 cm x 30 cm y se ubica a una altura de 70 cm.

## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Descripción de Elementos**

##### **2.1.1. Sistema de depósitos, tuberías e instrumentos**

En la construcción del sistema modular didáctico es importante el sistema de depósitos, ya que las especificaciones de estos son necesarias para realizar el control.

El sistema consta de dos tanques; el primero que permite la visualización de variaciones en el nivel, caudal y presión; el segundo tanque además de la función de reserva y almacenamiento permite realizar la regulación de la temperatura del fluido.

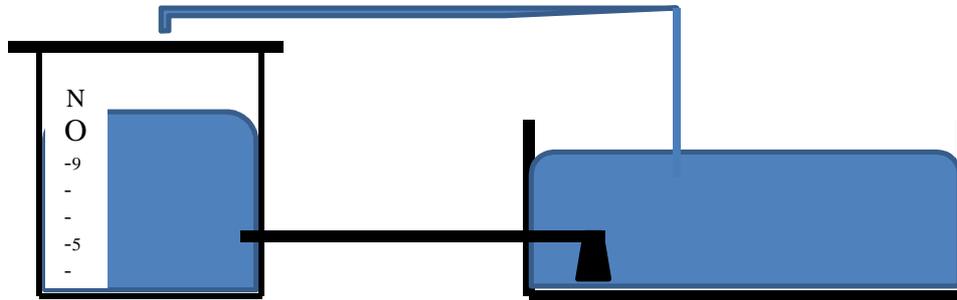


Figura 3. Sistema de Depósitos

Se usa tubería para la ubicación de instrumentos de medición así como para las funciones de llenado y desfogue de los tanques.

La tubería que se usa es de polipropileno (PP) de 1/2" para agua caliente y fría, para acoplar el sensor de caudal no se dispone de tubería de PP de 3/8" por lo que se hace necesaria la utilización de tubería galvanizada de 3/8" y dos bushing de 1/2" a 3/8".

Los accesorios de tubería como codos, universales, uniones y neoplos que se utilizan el sistema de tuberías son de PP.

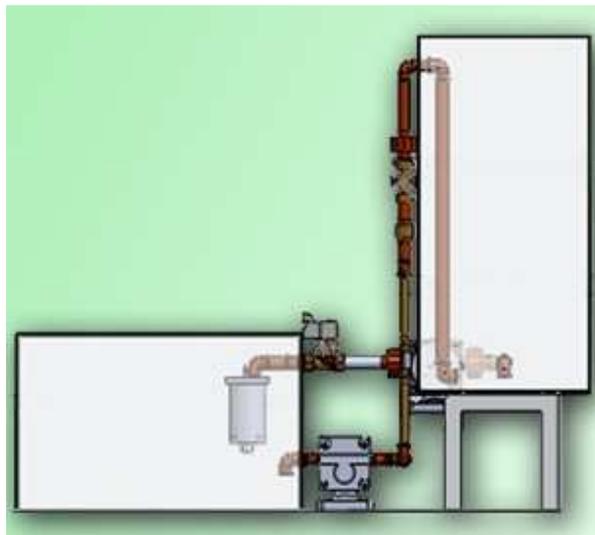


Figura 4. Sistema de tuberías

## 2.1.2. Sensores

Los principios que se aplican a la medición se utilizan en la determinación de temperaturas, flujos y niveles de líquidos. Por lo tanto, es muy importante conocer los principios generales de operación, los tipos de instrumentos, los principios de instalación, la forma en que se deben mantener los instrumentos, para obtener el mejor funcionamiento posible, cómo se debe usar para controlar un sistema o una operación y la manera como se calibran (Agelet, 2000).

### 2.1.2.1. Sensor de Presión

Presión es la fuerza por unidad de superficie, cuando la fuerza es perpendicular a dicha superficie. Esto es lo que ocurre comúnmente en fluidos confinados.

La presión siempre se mide respecto a una referencia o valor patrón, la cual puede ser el vacío absoluto u otra presión como en el caso más común en que se trata de la presión atmosférica. Según la referencia de presión utilizada se le dan nombres distintos a las medidas de presión.

#### **Presión absoluta**

Es la presión referida al vacío absoluto.

#### **Presión manométrica**

Es la presión referida a la presión atmosférica.

#### **Presión de vacío**

Es la presión referida a la presión atmosférica pero por debajo de ella.

#### **Presión diferencial**

Es la diferencia entre dos presiones cualesquiera

#### **Presión atmosférica**

Es la presión ejercida por el peso de la atmósfera sobre la tierra. AS nivel del mar esta es de aproximadamente 760 mm de Hg , 14.7 psia o 100 KPa.

#### **Presión barométrica**

Es la medida de la presión atmosférica la cual varía levemente con las condiciones climáticas.

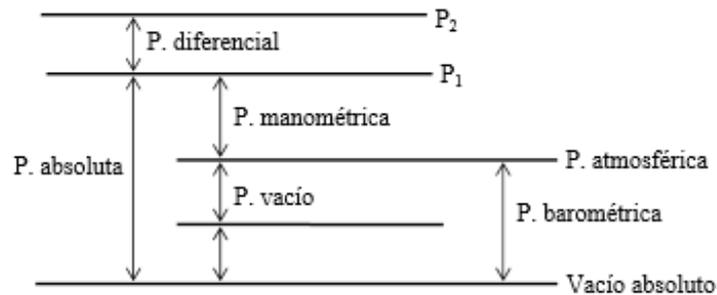


Figura 5. Presiones existentes

(Jean-Frnacois, 2008)

Los sensores de presión transforman la variable presión en un desplazamiento. Para ello utilizan la propiedad de los materiales de deformarse dentro del rango elástico cuando se someten a un esfuerzo y regresar a su posición cuando cesa el esfuerzo aplicado.



Figura 6. Curva de Deformación

(Jean-Frnacois, 2008)

Sabiendo que en este rango la relación esfuerzo deformación es lineal.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

Donde  $E$  define el módulo de elasticidad, que es una constante que relaciona el esfuerzo con la deformación en la zona elástica.

Los sensores de presión consisten en elementos de sección delgada que al someterse a una presión se deforman en su rango elástico, deformación que es proporcional a la presión. Existen principalmente tres tipos de sensores de presión:

- El tubo Bourdon
- El fuelle
- El diafragma

(Jean-Francis, 2008)

#### 2.1.2.2. Sensor de Caudal

El estudio del movimiento de los fluidos se puede realizar a través de la dinámica como también de la energía que estos tienen en su movimiento.

Una forma de estudiar el movimiento es fijar la atención en una zona del espacio, en un punto en un instante  $t$ , en él se especifica la densidad, la velocidad y la presión del fluido. En ese punto se examina lo que sucede con el fluido que pasa por él.

Los sensores de caudal recogen las velocidades del flujo de gases o líquidos. Los sensores de caudal usan diferentes principios de medición.

Entre los métodos más utilizados para medir caudales de agua, se encuentran los siguientes:

- Método del Flotador
- Método volumétrico
- Método de la Trayectoria
- Estructuras de medida

(López García, 2007)

### 2.1.2.3. Sensor de Nivel

El nivel es una de las variables de proceso más utilizada en un entorno industrial, específicamente en el control de almacenamiento de materias primas líquidas y sólidas en general. En la selección del tipo de medidor tienen preferencia, técnicamente, los medidores estáticos frente a los que tienen partes móviles y los que no necesitan contacto con el fluido y se ubican en lugares exteriores al recipiente, así como los que requieren menor modificación en la estructura del recipiente y sus soportes, especialmente cuando éstos están ya construidos.

En cuanto a métodos de medición de nivel, se puede decir que hoy en día se dispone de una amplia gama de técnicas de medición y, por ello, no siempre resulta fácil la elección del método de obtención de lecturas que se adapte mejor a los requerimientos específicos de una instalación.

No obstante, existen entre otras, las siguientes formas clásicas de medir el nivel del agua:

- Regla limnimétrica.
- Tubo piezométrico con visor de vidrio.
- Flotador.
- Medidor Neumático.
- Medidor con resistencia variable.
- Medidor con electrodos.
- Medidores ultrasónicos.

(Biblioteca Virtual de la Cooperación Internacional, 2012)

### 2.1.2.4. Sensor de temperatura

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el

principio cero de la termodinámica. Está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como energía cinética, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema. A medida de que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que éste se encuentra más caliente; es decir, que su temperatura es mayor y viceversa si la energía cinética es menor, se observa que su temperatura es menor.

Los sensores de temperatura se usan para medir la temperatura del aire o la temperatura superficial de líquidos y sólidos. Nuestra gama de sensores de temperatura es igual de amplia que las aplicaciones que se le pueden dar. Además de sensores de resistencia (Pt100) encontrara termoelementos del tipo K (NiCr-Ni)

(Meteolobios, 2013).

## **2.2. Procesos Industriales**

### **2.2.1. Aplicaciones del Equipo**

El almacenamiento de líquidos en tanques es de uso frecuente en el sector productivo, casos como: tanques en patios de refinación, combustible, agua, insumos en producción de alimentos, etc. son ejemplos de aplicaciones donde se utilizan tanques para el almacenamiento de líquidos de diferentes densidades y características. Adicionalmente, en ocasiones estos productos almacenados en tanques deben ser combinados de manera óptima, en la preparación de un derivado o insumo de otro proceso.

Este proyecto se dedica al estudio y desarrollo de herramientas para la instrumentación, control y monitoreo de sistemas de almacenamiento de líquidos en tanques. En tal sentido, se realiza la construcción de un tanque a escala en el cual se tiene control de las variables más comunes con fines académicos, con esta experiencia el estudiante está preparado para aplicaciones en el sector productivo nacional. Tareas como llenado, control de nivel, presión y de temperatura son de interés en este proyecto.

Una de las aplicaciones más usada es el control del nivel de un tanque de gasolina en los vehículos.

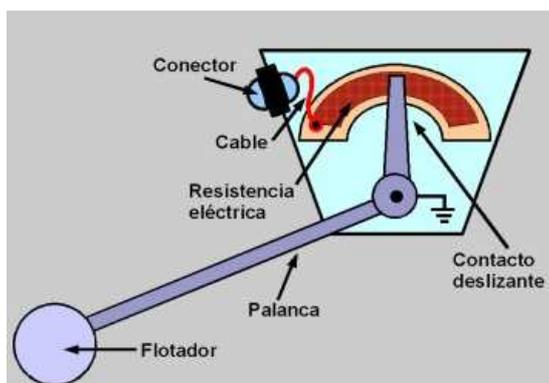


Figura 7. Esquema de como está construido el sensor de nivel que se coloca en el tanque

(Bruzos & Bruzos, 2013)



Figura 8. Control de tanques de Petróleo

(GuardMagic, 2014)

### 2.2.2. Sistemas de dos Depósitos

El control de nivel de líquido en depósitos y el flujo entre ellos es un problema en los procesos industriales. Los procesos industriales involucran el manejo de líquidos, operaciones de almacenaje y bombeo entre tanques los cuales deben ser controlados y monitoreados. Muchas veces el líquido es procesado con tratamientos químicos en los tanques. El control de nivel y flujo en tanques son el centro de todos los sistemas de

ingeniería química. Estas son algunas de las industrias donde el control de nivel y flujo son esenciales:

- Industrias de Petroquímica.
- Industrias de fabricación de papel.
- Industrias de tratamiento de agua.

Con la presencia de dos tanques se forma un sistema llamado de tanques acoplados. En los depósitos acoplados, los estados del sistema son el nivel  $H_1$  en el tanque 1 y  $H_2$  en el tanque 2.

La entrada de control es la velocidad de flujo de la bomba  $Q_h$ , entonces la variable a ser controlada es normalmente el segundo estado, el nivel  $H_2$ , y los disturbios son las variaciones causadas por el flujo y pérdidas del sistema.

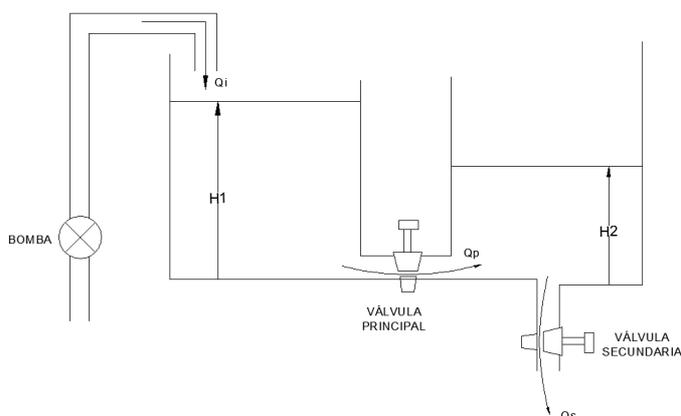


Figura 9. Sistema de tanques acoplados

### 2.2.3. Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Familiarizar al estudiante con el funcionamiento de los sensores y de los actuadores.
- Conocer un proceso industrial a escala.
- Trabajar con sistemas enlazados y diseñar un equipo para estudio y experimentación.

Desventajas:

- a) Los sensores utilizados son diferentes de los que hay en la industria.
- b) El sistema modular simula un entorno industrial, pero las magnitudes manejadas no se comparan con las que se presentan en la industria.

## CAPITULO 3

### DISEÑO DE LOS SISTEMAS MODULARES

#### 3.1. Alternativas y Soluciones

##### 3.1.1. Análisis de Posibles alternativas

Para realizar el análisis de las posibles alternativas se divide el módulo completo en tres módulos por los pasos del proyecto: medición, procesamiento, y control.

La función global del módulo didáctico a implementar, es monitorear las variables presentes en un tanque de almacenamiento de líquidos, y el control de las mismas.

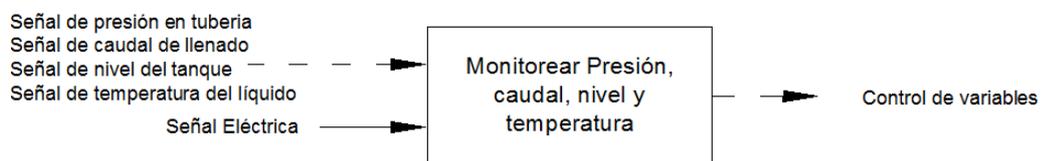


Figura 10. Análisis funcional módulo didactico – Nivel 0

Las funciones generales del sistema que realizará el módulo son:

- Medir las variables a controlar.
- Comparar con niveles referenciales.
- Lógica de control.
- Accionamiento de actuadores.

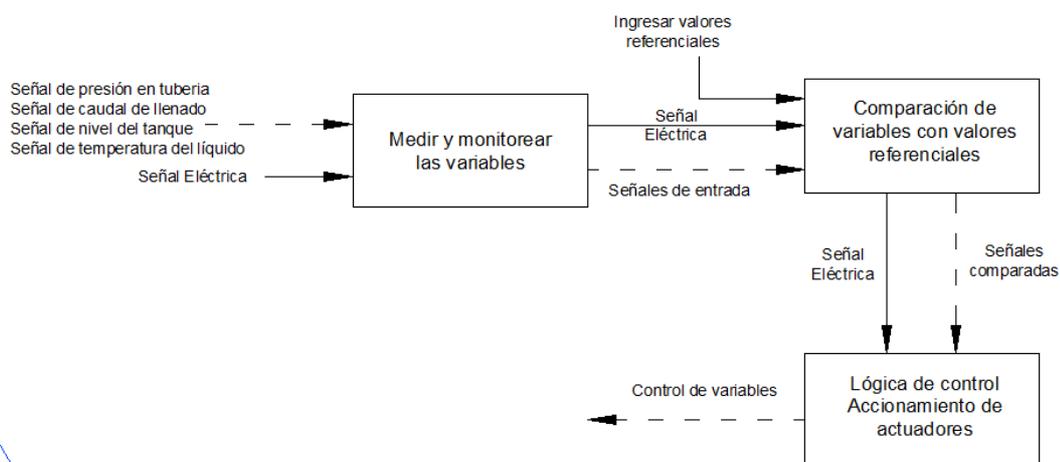


Figura 11. Análisis funcional módulo didáctico - Nivel 1

En el siguiente nivel se desglosan varias acciones implícitas que en el nivel anterior no se especifican:

- 1.- Calibrar Sensores.
- 2.- Acondicionamiento sensores.
- 3.- Medir presión nivel caudal y temperatura.
- 4.- Ingresar valores referenciales.
- 5.- Comparar valores referenciales
- 6.- Lógica de Programación
- 7.- Accionar Actuadores

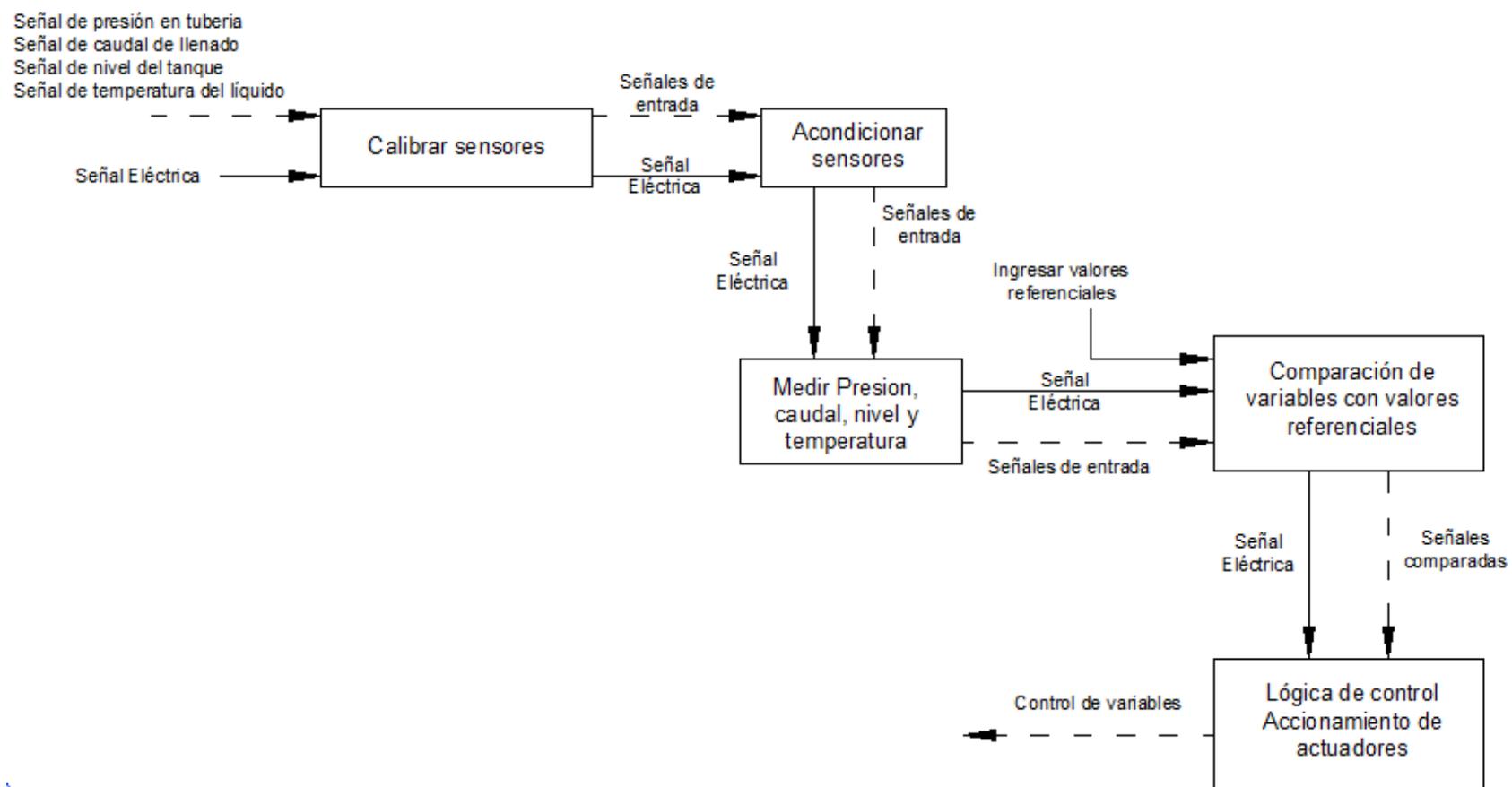


Figura 12. Análisis funcional módulo didáctico - Nivel 2

De esta forma los módulos funcionales son:

- Módulo 1: Medición de variables
- Módulo 2: Comparación de valores
- Módulo 3: Accionamiento de Actuadores

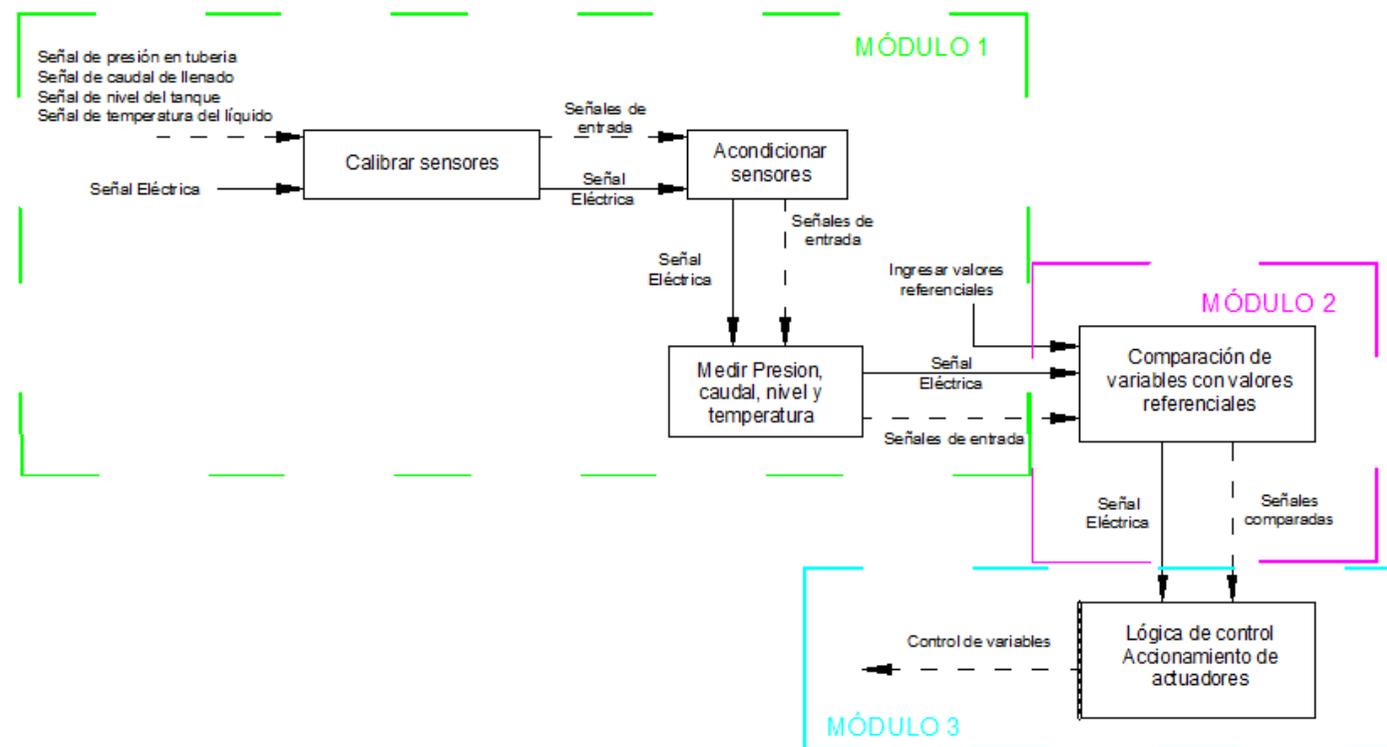


Figura 13. Módulos funcionales del Módulodidáctico

A continuación se presentan las posibles soluciones de los diferentes módulos:

- La solución para el MODULO 1 se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2.

Matriz morfológica Módulo 1

Función	Componente	
<b>Medir presión</b>	Presostato	Diafragma
<b>Medir caudal</b>	Sensor ultrasónico	Turbinas
<b>Medir nivel</b>	Flotadores	Sensor Ultrasónico
<b>Medir temperatura</b>	Termocupla	PT-100

**Alternativa 1**

**Alternativa 2**

- La solución para el MODULO 2 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.

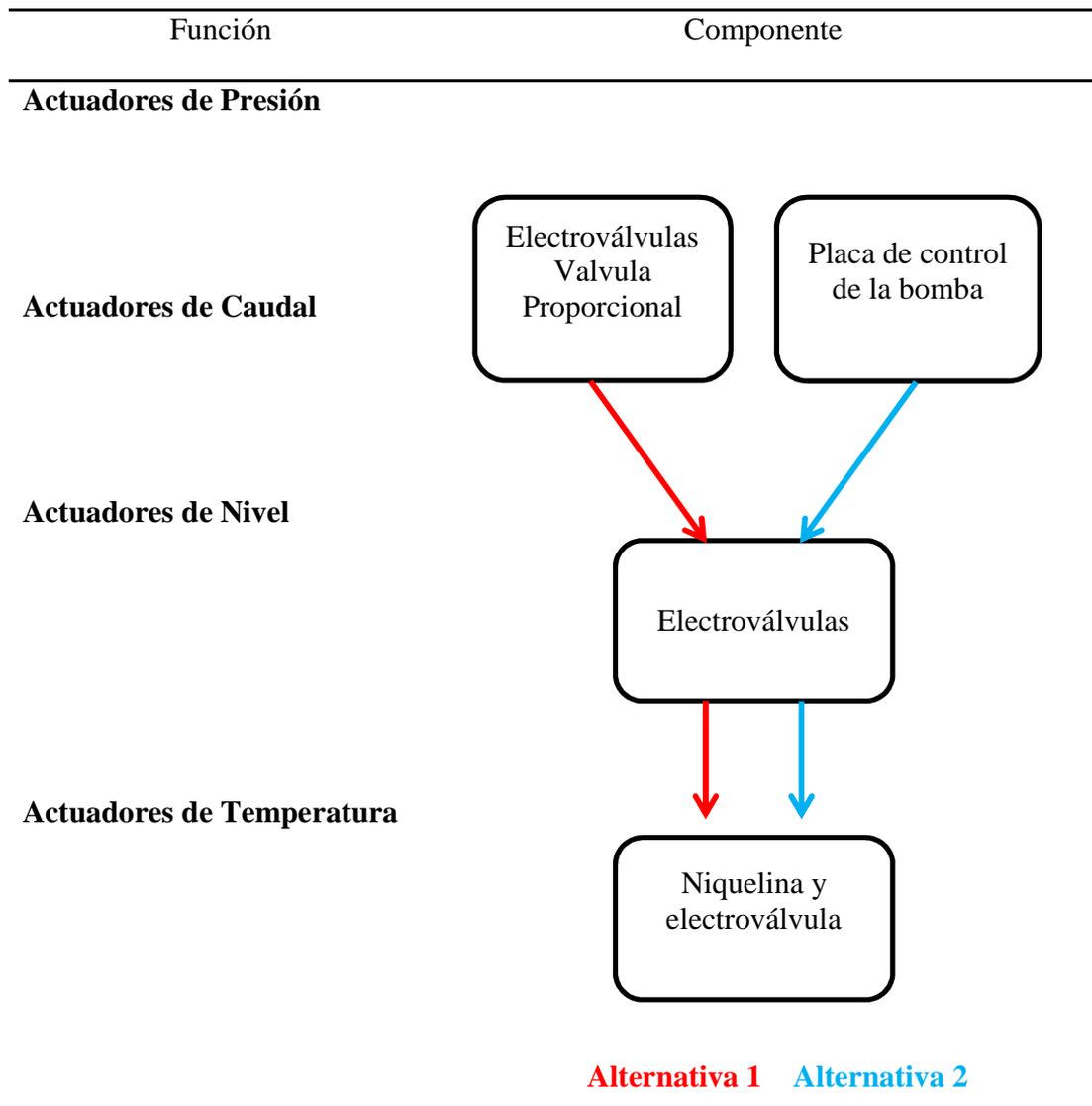
Matriz morfológica MODULO 2

Función	Componente	
<b>Recepción de señales</b>		
<b>Procesamiento de Señales estandarizadas.</b>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           Arduino Mega 2560         </div>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           PLC         </div>
<b>Ingreso de valores de para la comparación.</b>	↓	↓
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           TFT LCD Arduino         </div>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           Touch screen siemens         </div>
<b>Software de Programación.</b>	↓	↓
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           Software Arduino         </div>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">           Programación ladder         </div>
	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>

- La solución para el MODULO 3 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Matriz morfológica MODULO 3



### 3.1.2. Selección de las Soluciones

#### ➤ METODO DE RESIDUOS PONDERADOS

A fin de determinar la solución que resulte más conveniente se emplea el método ordinal corregido de criterios ponderados.

#### MODULO 1

Las alternativas de solución para el MODULO 1 son:

- Medir presión:
- Alternativa 1:



Código	157007
Referencia	061B300666 MBC 5000-3441-1CB04
Rango	5,00 - 30,00 bar
Diferencial ajustable	2,00 bar a 7,00 bar
conexion	G 1/4
Fluidos	
Característica electrica	Contacto SPDT
Proteccion	IP65
Presion Maxima	150,0 bar
Marca	<i>Danfoss</i>
Existencia	Inmediata

Figura 14. Presostato

(Via Industrial, 2012)

El presóstato Danfoss también es conocido como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido

- Alternativa 2: Diafragma

Se basa en capsulas circulares conectadas entre sí por soldadura, las cuales generan un movimiento, este será la variación de la presión

Se aplica en presiones pequeñas.

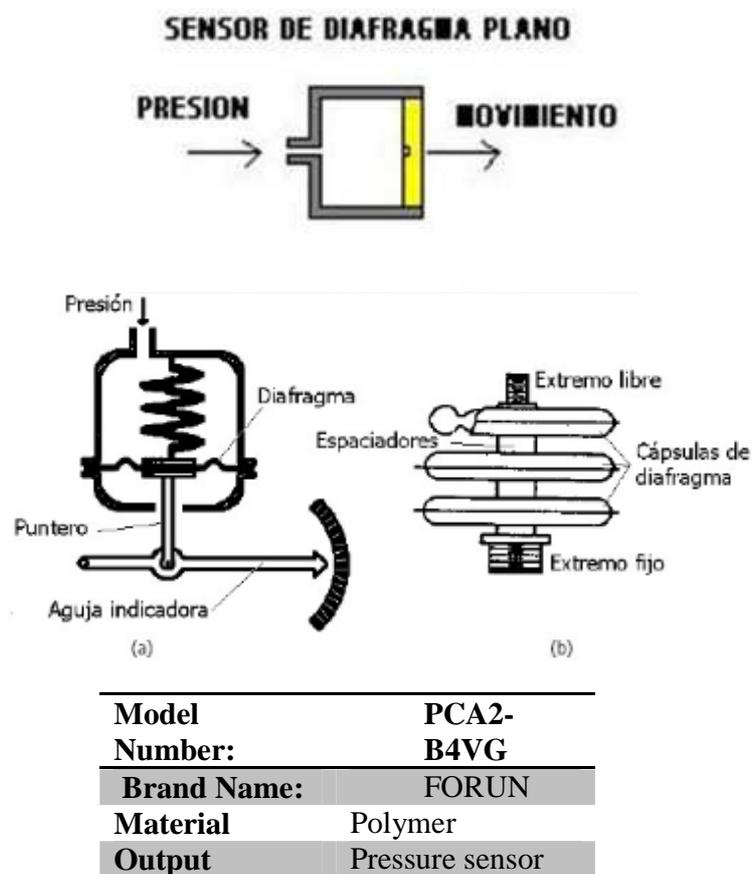


Figura 15. Funcionamiento de sensor de presión tipo membrana

(Forun, 2012)

- Medir Caudal

- ❖ Alternativa 1: Turbinas

El medidor de caudal opera bajo el principio de rueda de turbina. El líquido fluye primero a través de un elemento de flujo laminar para eliminar turbulencia y llevar la corriente de flujo a la rueda de turbina. La turbina empieza entonces a rotar. Este movimiento rotatorio es medido sin contacto por magnetos acoplados en la turbina y convertido a una señal de frecuencia. La frecuencia es proporcional a la velocidad del caudal.

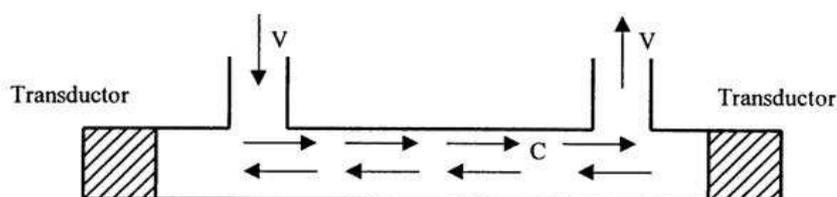


<b>Measures flow rates</b>	<b>1.5-15 LPM</b>
<b>Salida:</b>	Pulsos 0-20, 4-20 mA
<b>Pressure operating</b>	200PSIG
<b>Input power</b>	5-24 VDC

Figura 16. Funcionamiento de sensor de nivel tipo turbina  
(Kobold, 2007)

❖ Alternativa 2: Ultrasónico

Los medidores de flujo ultrasónicos miden la velocidad del flujo por la diferencia de velocidad del sonido al propagarse ésta en el sentido del flujo y en el sentido contrario.



<b>Rango de caudal:</b>	<b>2-5 L/min agua</b>
<b>Pmáx:</b>	200bar
<b>Salida:</b>	Pulsos 0-20, 4-20 mA
<b>Input power</b>	12 VDC

Figura 17. Funcionamiento sensor de flujo tipo ultrasonico

(Turboflow, 2012)

- Medir Nivel
- ❖ Alternativa 1: Sensor ultrasónico

El HC-SR04 es un sensor ultrasónico de bajo costo que no sólo puede detectar si un objeto se presenta, como un sensor PIR (Passive Infrared Sensor), sino que también puede sentir y transmitir la distancia al objeto.

Tienen dos transductores, básicamente, un altavoz y un micrófono.

Ofrece una excelente detección sin contacto (remoto) con elevada precisión y lecturas estables en un formato fácil de usar.

El funcionamiento no se ve afectado por la luz solar o el material negro como telémetros ópticos (aunque acústicamente materiales suaves como telas pueden ser difíciles de detectar).

La velocidad del sonido en el aire (a una temperatura de 20 °C) es de 343 m/s. (por cada grado centígrado que sube la temperatura, la velocidad del sonido aumenta en 0,6 m/s)

### **Características técnicas:**

1. Los módulos incluyen transmisores ultrasónicos, el receptor y el circuito de control.
2. Número de pines:  
VCC: Alimentación +5V (4.5V min – 5.5V max)  
TRIG: Trigger entrada (input) del sensor (TTL)  
ECHO: Echo salida (output) del Sensor (TTL)  
GND
3. Corriente de reposo: < 2mA
4. Corriente de trabajo: 15mA
5. Ángulo de medición: 30°
6. Ángulo de medición efectivo: < 15°
7. Detección de 2cm a 400cm o 1" a 13 pies (Sirve a más de 4m, pero el fabricante no garantiza una buena medición).
8. “Resolución” La precisión puede variar entre los 3mm o 0.3cm.

9. Dimensiones: 45mm x 20mm x 15mm
10. Frecuencia de trabajo: 40KHz

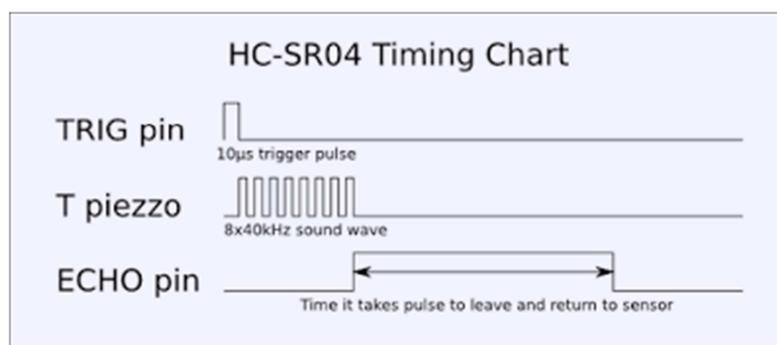


Figura 18. Funcionamiento de pines de sensor ultrasónico de nivel

(Soria, 2013)

#### Funcionamiento:

1. Enviar un Pulso "1" de al menos de 10µs por el Pin Trigger (Disparador).
2. El sensor enviará 8 Pulsos de 40KHz (Ultrasonido) y coloca su salida Echo a alto (seteo), se debe detectar este evento e iniciar un conteo de tiempo.
3. La salida Echo se mantendrá en alto hasta recibir el eco reflejado por el obstáculo a lo cual el sensor pondrá su pin Echo a bajo, es decir, terminar de contar el tiempo.
4. Se recomienda dar un tiempo de aproximadamente 50ms de espera después de terminar la cuenta.
5. La distancia es proporcional a la duración del pulso y puedes calcularla con la siguiente formula (Utilizando la velocidad del sonido = 340m/s):

Distancia en cm (centímetros) = Tiempo medido en us x 0.017

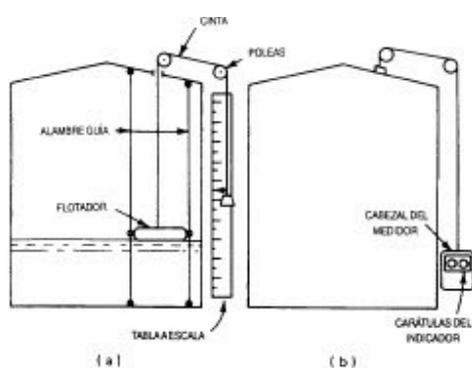
#### Nota:

- Tener en cuenta, que la distancia que recorre la onda es dos veces (**x2**) la distancia del objeto, al usar: "distancia recorrida = velocidad x tiempo transcurrido"

- Conecte el pin GND primero antes de suministrar alimentación a VCC.
- Por favor, asegúrese de que la superficie del objeto a detectar debe tener al menos 0,5m para un mejor rendimiento.

❖ Alternativa 2: Flotadores

Consiste en un flotador ubicado en contacto con el fluido y conectado al exterior del depósito indicando directamente el nivel sobre una escala graduada.



Medidores de flotador y cinta.  
a) Indicador de tabla a escala.  
b) Medidor de lectura en tierra

Figura 19. Funcionamiento sensor de nivel tipo flotador

(Inacap, 2012)

La serie ERH, fabricado por Aplisens, es un interruptor de nivel equipado con una versión a prueba de explosiones. Tiene una clase de protección IP 66/68, capacidad de presión nominal de 40 bar y partes 321SS mojadas. Este interruptor de nivel está diseñado para detectar el nivel de punto de un líquido de todo tipo de contenedores.

(Direct Industry, 2015)

- Medir Temperatura

- ❖ Alternativa 1: PT100

Un RTD (del inglés: resistance temperature detector) es un detector de temperatura resistivo, es decir, un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Su símbolo es el siguiente, en el que se indica una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo.

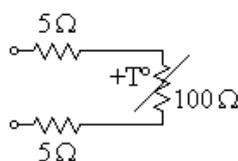


Figura 20. Funcionamiento de un sensor de temperatura tipo PT100

- ❖ Alternativa 2: Termocupla

Un termopar (también llamado termocupla) es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los mili voltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o de medida y el otro llamado punto frío o de referencia (efecto Seebeck).

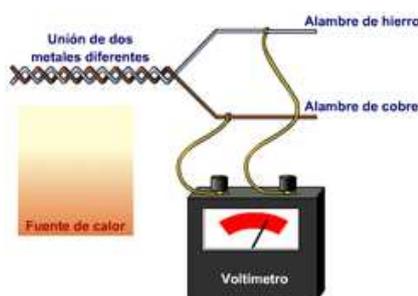


Figura 21. Funcionamiento de sensor de temperatura tipo termocupla

(Benitez, 2005)

Los criterios de valoración más determinantes para este módulo se listan a continuación:

- **Precisión:** para el control es necesario manejar como máximo un error de  $\pm 5\%$  puesto que determinará la calidad del módulo.
- **Fácil mantenimiento:** Debido a que será utilizado en un laboratorio, el mantenimiento del módulo será constante al ser instrumentos de fácil mantenimiento el tiempo de vida de los instrumentos y el módulo en general será mayor; además si se tiene alguna falla debe ser fácil de ser reemplazado en poco tiempo.
- **Costos:** Al ser un proyecto de tesis los costos deben estar de acuerdo al presupuesto previamente elaborado; además se debe tomar en cuenta que la sumatoria del costo de los instrumentos debe ser inferior al precio de un módulo didáctico que se lo pueda adquirir en el mercado.

La evaluación de los criterios y módulos se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 5.

Evaluación de criterios MÓDULO 1

	<b>Mayor precisión</b>	<b>Fácil y rápido montaje</b>	<b>Menor costo</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Mayor precisión</b>		0.5	1	2.5	0.35
<b>Fácil mantenimiento</b>	1		0.5	2.5	0.35
<b>Menor Costo</b>	0.5	0.5		2	0.3
			Suma	7	1
<b>Fácil mantenimiento= Mayor precisión &gt; Menor costo</b>					

A continuación se evalúa las alternativas de solución respecto a cada criterio:

- **Medir presión**
- ❖ Alternativa 1: Presóstato
- ❖ Alternativa 2: Diafragma

Tabla 6.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a Mayor precisión

Mayor precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 7.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 8.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo

Menor costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 1:

Tabla 9.

Conclusiones MODULO 1

Conclusiones	Mayor precisión	Fácil mantenimiento	Menor costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.33x0.35	0.33x0.35	0.66x0.3	0.43	2
<b>Alternativa 2</b>	0.66x0.35	0.66x0.35	0.33x0.3	0.56	1

- **Medir Caudal**

- ❖ Alternativa 1: Turbinas
- ❖ Alternativa 2: Ultrasonido

Tabla 10.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a Mayor precisión

Mayor precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 11.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Tabla 12.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 1:

Tabla 13.

Conclusiones MODULO 1

Conclusiones	Mayor Precisión	Fácil mantenimiento	Menor Costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.33x0.35	0.66x0.35	0.66x0.3	0.56	1
<b>Alternativa 2</b>	0.66x0.35	0.33x0.35	0.33x0.3	0.43	2

- **Medir Nivel**

- ❖ Alternativa 1: Sensor ultrasónico

- ❖ Alternativa 2: Flotadores

Tabla 14.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a mayor precisión

Mayor Precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Tabla 15.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 16.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 1:

Tabla 17.

## Conclusiones MODULO 1

Conclusiones	Mayor Precisión	Fácil mantenimientno	Menor Costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.66x0.35	0.33x0.35	0.33x0.3	0.45	1
<b>Alternativa 2</b>	0.33x0.35	0.66x0.35	0.66x0.3	0.55	2

- **Medir Temperatura**

- ❖ Alternativa 1: PT100

- ❖ Alternativa 2: Termocupla

Tabla 18.

## Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor precisión

Mayor Precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderació n
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Tabla 19.

## Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.5
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.5
			4	1
<b>Alternativa 2 = Alternativa 1</b>				

Tabla 20.

Evaluación soluciones MODULO 1 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 1:

Tabla 21.

Conclusiones MODULO 1

Conclusiones	Mayor Precisión	Fácil y rápido montaje	Menor Costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.66x0.35	0.5x0.35	0.33x0.3	0.50	2
<b>Alternativa 2</b>	0.33x0.35	0.5x0.35	0.66x0.3	0.50	1

## MODULO 2

Las alternativas de solución para el MODULO 2 son:

- Alternativa 1: Usar las entradas analógicas del arduino
- Alternativa2: Usar las entradas analógicas del PLC.

Alternativa 1: Arduino Mega



Figura 22. Arduino Mega 2560

(Arduino, 2015)

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega2560 (ficha técnica). Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas seriales), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador de CA o la batería a CC para empezar.

Alternativa 2: PLC



Figura 23. PLC

(Universidad Don Bosco, 2006)

PLC de SIEMENS LOGO, es el pequeño gigante de los autómatas para procesos sencillos. Solamente posee 6 entradas digitales (que por cierto funcionan con 1 lógico= 110Vac y 0 lógico= 0V) y cuenta con 4 poderosas salidas de Relé que manejan hasta 8A para corriente alterna y 220Vac. Si un proceso solamente requiere de 6 entradas y 4 salidas o menos, el LOGO es la mejor solución pues es muy económico y tiene incluso más funciones que los predecesores SIMATIC S5 (por supuesto refiriéndonos a funciones digitales). La forma de programación es FUP y además no necesita computadora para su programación. Hay más modelos de LOGO con más entradas y salidas, pero al menos el que se muestra en la figura se puede utilizar en muchas aplicaciones.

El LOGO incluye una pantalla de cristal líquido a través de la cual se puede introducir casi cualquier función digital. No hay mayor complicación con respecto a los módulos de programación y otras funciones que son necesarias en un proceso sencillo. Además el LOGO puede conectarse a una red que permite a los nuevos PLC de la SIEMENS hacer las conexiones de las salidas y entradas lo más cerca posible de la planta y ya no más la gran cantidad de alambres desde la planta hacia el PLC, sino que un simple par lleva toda la información de las entradas y salidas. En el laboratorio se cuenta con un programa simulador que permite estudiar la forma de programar el LOGO tal y como si se tuviera con el aparato real.

Los criterios de valoración más determinantes para este módulo se listan a continuación:

- Velocidad de transmisión
- Fácil mantenimiento
- Costos

La evaluación de los criterios y módulos se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 22.

Evaluación criterios MODULO 1

	<b>Velocidad de transmisión</b>	<b>Fácil y rápido montaje</b>	<b>Menor Costo</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Velocidad de transmisión</b>		0.5	0.5	2	0.3
<b>Fácil mantenimiento</b>	1		1	3	0.4
<b>Menor Costos</b>	0.5	0.5		2	0.3
			Suma	7	1
<b>Fácil y rápido montaje &gt; Menor Costo= Velocidad de transmisión</b>					

A continuación se evalúa las alternativas de solución respecto a cada criterio:

Tabla 23.

Evaluación soluciones MODULO 2 respecto a Velocidad de Transmisión

Velocidad de Transmisión	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Tabla 24.

Evaluación soluciones MODULO 2 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 25.

Evaluación soluciones MODULO 2 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.66
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.33
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 2:

Tabla 26.

Conclusiones MODULO 2

Conclusiones	Velocidad de Transmisión	Fácil Mantenimiento	Menor Costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.66x0.3	0.33x0.4	0.66x0.3	0.53	1
<b>Alternativa 2</b>	0.33x0.3	0.66x0.4	0.33x0.3	0.47	2

### MODULO 3

Las alternativas de solución para el MODULO 3 son:

- Actuadores de presión
- ❖ Alternativa 1: bomba controlada por PWM

La bomba de agua dulce fue creada con un diafragma de una sola pieza y de derivación interna, asegurando una larga vida útil y el máximo rendimiento en todos los sistemas de plomería. Está construido para la demanda de flujo alto, bajo ruido y sin ciclos rápidos.

La bomba es de 3 GPM, 55 PSI, es también una mini central eléctrica, la entrega de tres galones de agua por minuto para fregaderos integrados, aseos, duchas y más, mientras que sólo requiere un consumo de energía razonable de 7,5 amperios de una fuente de energía VDC a bordo 12. Convenientemente, se puede montar en cualquier posición, está protegido térmicamente, pueden funcionar en seco sin daño y utiliza tecnología pendiente de patente de flujo de reacción para reducir el ruido, la vibración y demasiados ciclos de la bomba.



Figura 24. Bomba de Agua controlada por PWM

(SHURFLO, 2011)

❖ Alternativa 2: Válvula proporcional



Figura 25. Valvula Proporcional

(Danfoss, 2010)

La válvula proporcional convierte una señal eléctrica analógica de entrada en una determinada posición de la corredera y, por ende, una concreta apertura de la sección transversal del paso de aire a través de la corredera. Para 5V la válvula se coloca en la posición intermedia con centros cerrados. No hay paso de aire más que la mínima fuga natural hacia escape, debida a la forma constructiva de la válvula. (Neumática Proporcional)

- Actuadores de Caudal

- ❖ Alternativa 1: Válvula Proporcional

Su funcionamiento y definición está citado anteriormente.

- ❖ Alternativa 2: Bomba controlada por PWM

Su funcionamiento y definición está citado anteriormente.

- Actuadores de Nivel

- ❖ Alternativa 1: Electroválvulas



Figura 26. Electroválvula

(Timer Pneumatic, 2007)

Estas válvulas se utilizan cuando la señal proviene de un temporizador eléctrico, un final de carrera eléctrico, presostatos o mandos electrónicos. En general, se elige el accionamiento eléctrico para mandos con distancias extremadamente largas y cortos tiempos de conexión. Las electroválvulas o válvulas electromagnéticas se dividen en válvulas de mando directo o indirecto. Las de mando directo solamente se utilizan para un diámetro de luz pequeño, puesto que para diámetros mayores los electroimanes necesarios resultarían demasiado grandes. (Martínez, 2007)

- Actuadores de Temperatura
- ❖ Alternativa 1: Niquelina



Figura 27. Niquelina

(INCOLOY, 2003)

Las resistencias calentadoras, niquelinas, convierten energía eléctrica en calor. En la actualidad las resistencias calentadoras se utilizan para infinidad de aplicaciones. La gran mayoría de ellas son fabricadas con un alambre de una aleación de níquel (80%) y

romo (20%). Esta aleación soporta temperaturas muy altas (1000° C), es resistivo (condición necesaria para generar calor), es muy resistente a los impactos y es inoxidable. (Wikipedia, 2015)

Los criterios de valoración más determinantes para este módulo se listan a continuación:

- Eficiencia
- Fácil mantenimiento
- Costos

La evaluación de los criterios y módulos se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 27.

Evaluación criterios MODULO 3

	Mayor Eficiencia	Fácil mantenimeinto	Menor Costos	$\sum+1$	Ponderación
<b>Mayor Eficiencia</b>		1	1	3	0.4
<b>Fácil mantenimiento</b>	0.5		0.5	2	0.3
<b>Menor Costo</b>	0.5	0.5		2	0.3
			Suma	7	1
<b>Mayor Eficiencia &gt;Fácil mantenimiento =Menor Costo</b>					

A continuación se evalúa las alternativas de solución respecto a cada criterio

- Actuador de presión
  - ❖ Alternativa 1: bomba controlada por PWM
  - ❖ Alterativa 2: Válvula Proporcional

Tabla 28.

Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a Mayor eficiencia

Mayor eficiencia	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.5
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.5
			4	1
<b>Alternativa 1 = Alternativa 2</b>				

Tabla 29.

Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.5
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.5
			4	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Tabla 30.

Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		1	2	0.33
<b>Alternativa 2</b>	0		1	0.66
			3	1
<b>Alternativa 1 &gt; Alternativa 2</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 3:

Tabla 31.

## Conclusiones MODULO 3

Conclusiones	Mayor Eficiencia	Facil Mantenimiento	Menor Costo	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.5x0.4	0.5x0.3	0.33x0.3	0.56	1
<b>Alternativa 2</b>	0.5x0.4	0.5x0.3	0.66x0.3	0.43	2

- Actuadores de Caudal
- ❖ Alternativa 1: Válvula Proporcional
- ❖ Alternativa 2: bomba controlada por PWM

Tabla 32.

## Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a mayor eficiencia

Mayor Eficiencia	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderació n
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 33.

## Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a fácil mantenimiento

Fácil mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	1	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		2	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Tabla 34.

Evaluación soluciones MODULO 3 respecto a menor costo

Menor Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
<b>Alternativa 1</b>		0	2	0.33
<b>Alternativa 2</b>	1		1	0.66
			3	1
<b>Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>				

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones para el MODULO 3:

Tabla 35.

Conclusiones MODULO 3

Conclusiones	Mayor Eficiencia	Fácil mantenimiento	Menor Costo	$\sum$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.33x0.4	0.66x0.3	0.33x0.3	0.43	1
<b>Alternativa 2</b>	0.66x0.4	0.33x0.3	0.66x0.3	0.56	2

- Actuadores de Nivel
  - ❖ Alternativa 1: Electroválvulas, no hemos encontrado otra forma de control para nivel, es por esto que nuestra alternativa de electroválvulas de entrada y salida será la q se usará para el módulo.
- Actuadores de Temperatura
  - ❖ Alternativa 1: Niquelina, esta alternativa es la más viable y fácil de instalar, por lo tanto hemos optado como la única opción.
- ESQUEMAS DE LA SOLUCION Y MODULOS

Como resultado del análisis por medio del método de residuos ponderados se tiene las siguientes soluciones como primera prioridad.

**MODULO 1:**

Medir Presión: Sensor de diafragma

Medir Caudal: Turbinas

Medir Nivel: Sensor ultrasónico

Medir Temperatura: Pt 100

**MODULO 2:**

Usar las entradas analógicas del arduino

**MODULO 3:**

Actuador de Presión: Bomba controlada por PWM

Actuador de Caudal: Bomba controlada por PWM

Actuador de Nivel: Electroválvulas

Actuador de Temperatura: niquelina y electroválvula

## **3.2. Sistema Mecánico**

### **3.2.1. Análisis Cinemático del Sistema**

El Sistema Modular Didáctico para control de Caudal, Nivel y Presión, utiliza agua como fluido de trabajo, por lo que su comportamiento durante el proceso de regulación es de gran importancia.

La cinemática estudia el movimiento en sus condiciones de espacio y tiempo, sin tener en cuenta las causas que lo producen. El análisis cinemático de un fluido permite:

- Clasificar un flujo según su comportamiento cinemático.
- Aplicar los métodos de descripción de un flujo.
- Utilizar las líneas de corriente, de trayectoria y de traza para describir un flujo.
- Obtener las líneas de corriente a partir de un campo de velocidades.
- Aplicar la ecuación de transporte a las propiedades de interés del flujo.
- Aplicar el principio de conservación de la masa en diferentes circunstancias de flujo.

Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo; a este régimen se le conoce como “flujo laminar“. Conforme aumenta la velocidad y se alcanza la llamada “velocidad crítica“, el flujo se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos; a este régimen se le conoce como “flujo turbulento“. El paso de régimen laminar a turbulento no es inmediato, sino que existe un comportamiento intermedio indefinido que se conoce como “régimen de transición“. (EIA, 2013)

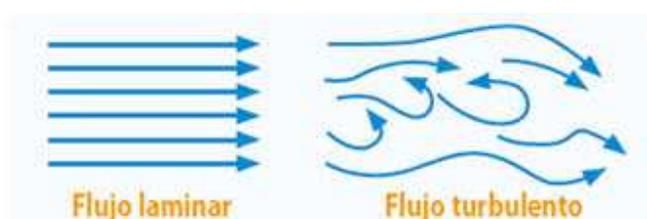


Figura 28. Régimenes de flujo

(Dakhma, 2013)

Para el flujo laminar, la curva de velocidad en relación con la distancia de las paredes es una parábola y la velocidad promedio es exactamente la mitad de la velocidad máxima. Para el flujo turbulento la curva de distribución de velocidades es más plana (tipo pistón) y el mayor cambio de velocidades ocurre en la zona más cercana a la pared.



Figura 29. Distribuciones típicas de velocidad

(Dakhma, 2013)

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un parámetro adimensional cuyo valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

El número de Reynolds relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye. (Valvias, 2014)

En una tubería circular se considera:

- $Re < 2300$ , el flujo sigue un comportamiento laminar.
- $2300 < Re < 4000$ , zona de transición.
- $Re > 4000$ , el fluido es turbulento.

El número de Reynolds está dado por:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

donde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro del ducto

v = Velocidad promedio del líquido

$\rho$  = Densidad del fluido

$\mu$  = Viscosidad del fluido

En el caso del Sistema Modular se calcula la velocidad promedio cuando la bomba esta a su máxima capacidad; de la tabla de características técnicas de la bomba se tiene que a su máxima capacidad el caudal promedio obtenido es de 3 GPM. La velocidad promedio se calcula empleando la expresión:

$$v = Q/A$$

Donde:

Q = caudal

A = área transversal

v = velocidad del fluido

$$v = \frac{3 \frac{gl}{min} \cdot \frac{1m^3}{264.55gl} \cdot \frac{1 min}{60 seg}}{\frac{\pi(0.0161m)^2}{4}}$$

$$v = 0,9284 \text{ m/s}$$

Con la velocidad promedio obtenida, se tienen los datos necesarios para calcular el número de Reynolds.

Tabla 36.

Datos Número de Reynolds

Dato	Valor
<b>Díametro interior (tubería de 1/2")</b>	16,1 mm
<b>Velocidad promedio</b>	0,9284 m/s
<b>Densidad del fluido (agua)</b>	1000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad del fluido (agua)</b>	0,001Kg/(m.s)

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,0161m \cdot 0,9284 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 14\,946,74$$

El número de Reynolds es mayor que 4000, por lo que el flujo a la salida de la bomba está en régimen turbulento. Se debe tomar en cuenta que este dato se obtiene despreciando las pérdidas de flujo por fricción y accesorios.

### 3.2.2.Consideraciones Generales de Diseño

El sistema modular didáctico para el control de nivel, caudal, presión y temperatura, consta de los siguientes subsistemas mecánicos:

- Sistema de Montaje, bastidor.
- Depósitos.
- Sistema de tuberías e instrumentación

### 3.2.2.1. Sistema de Montaje Bastidor

El sistema de montaje para el sistema modular, se diseña para alojar los sistemas: depósitos, tuberías e instrumentación, eléctrico, electrónico y control. La selección del material y las dimensiones del mismo se eligen para satisfacer las necesidades del sistema modular.

El bastidor permite acceso total para realizar el monitoreo y control de todos los sistemas y subsistemas que componen el módulo; la ergonomía es un factor indispensable en su diseño.

### 3.2.2.2. Depósitos

El sistema modular permite al estudiante realizar el control de un fluido en un tanque de almacenamiento; partiendo de este requerimiento, los depósitos deben facilitar un monitoreo constante del comportamiento del fluido.

Las dimensiones se asignan para realizar los diferentes controles, simulando un entorno industrial.

La presión y la temperatura máximas que alcanza el fluido son factores indispensables para escoger el material con el que se fabrican los depósitos.

### 3.2.2.3. Sistema de Tuberías e Instrumentación

El sistema modular permite monitorear y controlar las variables: nivel, presión, caudal y temperatura; para realizar esta operación es necesario medirlas con sensores adecuados para medición continua.

Un sistema de control de fluidos, debe contar con un sistema de tuberías, acorde a los requerimientos de funcionalidad. En este sistema se montan elementos de instrumentación que en caso de desperfecto pueden ser reemplazados sin necesidad de un desmontaje total del módulo, el sistema debe permitir realizar las operaciones de mantenimiento. El diseño correcto de este sistema garantiza la eficiencia del sistema.

### 3.2.2. Diseño del sistema de Distribución de Depósitos

El sistema modular se compone de dos depósitos A y B, sobre los cuales se realizan las operaciones de control, sus dimensiones se asignan en concordancia con los requerimientos de control y funcionamiento.

El depósito A tiene la forma de un prisma cuadrangular sin tapa superior sus dimensiones son 30\*30 cm de base y 60 cm de altura con lo que se logra una capacidad volumétrica total de 54 litros.

$$\text{Volumen total} = (30*30*60) \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = 54\ 000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = 54\ 000 \text{ cm}^3 * 1\text{litro}/1000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = 54 \text{ litros}$$

El ingreso y salida del fluido son orificios circulares de 1.6 cm de diámetro; el ingreso se encuentra en la cara lateral izquierda, a 55 cm de altura centrado entre las caras frontal y posterior. La salida del fluido se ubica en la cara posterior a 5 cm de altura y centrado entre las caras laterales. Con este dato podemos calcular el volumen de control al restar de la altura total las distancias hasta los orificios de ingreso y salida, dándonos un volumen de control de 45 litros.

$$\text{Volumen de control} = (30*30*(60-5-5)) \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de control} = 45\ 000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de control} = 45\ 000 \text{ cm}^3 * 1\text{litro}/1000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de control} = 45 \text{ litros}$$

El depósito B tiene forma de un prisma cuadrangular sin tapa superior cuyas dimensiones son 50\*50 cm de base y 30 cm de altura, logrando un volumen total de 75 litros.

$$\text{Volumen total} = (50*50*30) \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = 75\ 000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = 75\ 000 \text{ cm}^3 * 1\text{litro}/1000 \text{ cm}^3$$

**Volumen total = 75 litros**

El ingreso y salida del fluido son orificios circulares de 1.6 cm de diámetro; la salida del fluido se encuentra en la cara lateral derecha a 9 cm de altura y centrado entre las caras frontal y posterior. El ingreso se encuentra en la cara lateral derecha a 25 cm de altura y a 40 cm entre las caras frontal y posterior. Con este dato podemos calcular el volumen que se puede utilizar al restar de la altura total las distancias hasta los orificios de ingreso y salida, dándonos un volumen de 50 litros, cantidad superior al volumen de control debido a que este es el tanque de almacenamiento.

$$\text{Volumen útil} = (50 * 50 * (30 - 9 - 1)) \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen útil} = 50\,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen útil} = 50\,000 \text{ cm}^3 * 1 \text{ litro} / 1000 \text{ cm}^3$$

**Volumen útil = 50 litros**

El tanque B se encuentra dispuesto en la mesa del bastidor apoyado directamente; y el tanque A se ubica sobre un soporte a 20 cm de la mesa, esto facilita el vaciado del tanque A y el reingreso del fluido en el tanque B.

### 3.2.4. Diseño General del Sistema de Tuberías e Instrumentación

El sistema de tuberías permite dos funciones fundamentales: alojar elementos de instrumentación y transportar el fluido entre los tanques.

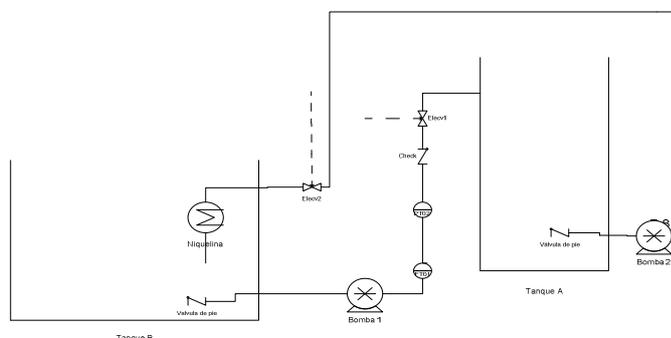


Figura 30. Diagrama P&ID

En el diagrama se puede localizar la posición de los sensores de presión y caudal, válvulas de control y los actuadores bomba 1, bomba 2 y niquelina, estos elementos están montados en el sistema de tuberías.

Se utiliza tubería y accesorios de 1/2" de Polipropileno para agua caliente y fría, se escoge este diámetro por motivos de disponibilidad y facilidad de manipulación. Los accesorios que se utilizan son:

- Codo de 90°, el cual permiten re direccionar al líquido.



Figura 31. Codo de 90°

(PLASTIGAMA, 2015)

- Unión universal, esta permite separar el sistema sin desarmarlo por completo.

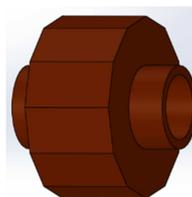


Figura 32. Unión universal

- Unión sencilla, conecta dos tuberías o accesorios con rosca tipo macho.

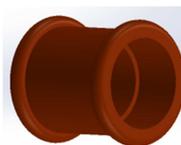


Figura 33. Unión sencilla

- Neplo, este accesorio permite unir dos accesorios con rosca tipo hembra.



Figura 34. Neplo

(PLASTIGAMA, 2015)

- Bushing, une dos tuberías o accesorios de diferentes diámetros.



Figura 35. Bushing

(PLASTIGAMA, 2015)

Existen además válvulas para el control del paso del fluido, las válvulas utilizadas son:

- Válvula check, permite el paso del fluido en un sentido, impidiendo con un cierre hermético flujo en el sentido opuesto.



Figura 36. Válvula check

(Faucets, 2011)

- Válvula de pie, se coloca en la toma de la bomba, impide que esta se quede sin líquido en su interior, para evitar daños por el ingreso de aire o impurezas hasta los alabes.



Figura 37. Válvula de pie  
(Bronzo)

- Electroválvula de acción directa normalmente cerrada, su apertura es controlada mediante una señal eléctrica.



Figura 38. Electroválvula de acción directa  
(Direct Industry, 2015)

La distribución de los elementos y accesorios de tubería se detalla a continuación.

Conexión Tanque B hacia Tanque A: Un codo de 90° ubicado lateralmente y dirigido hacia arriba actúa como toma de agua dentro del tanque B, este se conecta a otro codo de 90° que redirige el flujo lateralmente para permitir la conexión de la bomba; luego de esto se conecta un codo de 90° dirigido hacia el frente, niple de 3 cm, un codo de 90° dirigido hacia arriba; este se conecta a una reducción de 1/2" a 3/8" a continuación de esto se conecta un niple de 10 cm el cual se conecta al sensor de caudal y a continuación otro niple de 10 cm y una ampliación de 3/8" a 1/2"; luego de esto una T en la cual se conecta el sensor de presión tipo membrana; unido a un niple de 3 cm,

una válvula check, un neplo de 3 cm; a continuación una electroválvula un neplo y una unión universal; luego un neplo de 3 cm más un codo de 90° para ingresar al tanque A. mediante una unión a la cual se conecta otro codo de 90° dentro del tanque A y un tubo de 50 cm dirigido hacia abajo. En total se tienen 150 cm de tubería e instrumentos.

Conexión Tanque A hacia Tanque B: dentro del tanque A se ubica una unión la cual sirve como toma de agua, esta se conecta a un neplo corrido para salir del tanque y este a su vez a otra unión, la presión entre las dos uniones impide que existan fugas en la toma del tanque, a continuación se conecta un neplo de 10 cm y éste a un codo de 90°; seguido de un neplo y una universal; a continuación la bomba y otra universal; seguido de un neplo de 3 cm, una electroválvula y mediante un neplo corrido y una unión ingresa al tanque B se une con un neplo y un codo de 90° dirigido hacia abajo. En total son 60 cm de tubería.

En un sistema perfecto, existen siempre tres tipos de energía, suponiendo que se usa un fluido incompresible como el agua.

- Energía de Presión.
- Energía Cinética.
- Energía Potencial.

En cualquier punto de un sistema perfecto la suma de estas tres partes de energía debe ser igual a la suma de estas tres partes en cualquier otro punto del sistema.

Esto se debe a que la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma. Esto es todo lo que el TEOREMA DE BERNOULLI nos demuestra.

El Teorema de Bernoulli, para un sistema perfecto, o sea en el que no existe la fricción, se expresan matemáticamente estas tres diferentes formas de Energía como presiones, como se muestra en la siguiente expresión.

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Energía de Presión como Presión en el punto 1      Energía Cinética como Presión en el punto 1      Energía Potencial como Presión en el punto 1

En el mundo real los sistemas no son perfectos, la energía en un sistema real se pierde en forma de fricción. Esto se puede notar por el sonido y el calor generado por un fluido contra las paredes de la tubería, rozando entre ellas mismas y por la turbulencia en el flujo. La cantidad de la pérdida por fricción se ve afectada por los siguientes parámetros:

- La longitud de la tubería, entre más larga sea la tubería, mayor será la pérdida por fricción.
- La aspereza de las paredes de la tubería, entre más lisa sea la superficie de la tubería menores serán las pérdidas por fricción.
- El diámetro de la tubería, entre más pequeño sea el diámetro de la tubería mayor será la pérdida por fricción.
- La velocidad del fluido, entre más alta sea la velocidad del fluido, mayor es la pérdida por fricción.
- El régimen de flujo, un flujo turbulento causará mayores pérdidas por fricción que un flujo laminar.
- Cambios en la forma o sección de una tubería. Accesorios, válvulas, codos, etc., todo aumenta las pérdidas por fricción.

Las pérdidas por fricción no son lineares. Esto significa que si se duplica alguno de los parámetros anteriores, las pérdidas por fricción pueden triplicarse e incluso cuadruplicarse. Por otra parte, si no hay flujo entonces no hay pérdidas por fricción.

En la práctica, la pérdida de fricción se calcula de acuerdo a tablas en las que se especifica el tipo de tubería, el material del que está hecho, el coeficiente de fricción del

material, diámetro, longitud y la cantidad de flujo. La pérdida por fricción se puede expresar como presión por medio de la siguiente relación.

$$f_p = f_h \cdot \rho \cdot g$$

Una bomba, en pocas palabras, es un elemento que provee de Energía a un sistema, es por esto que la presión de la Bomba ( $P_p$ ) se encuentra generalmente al lado izquierdo de la ecuación y la fricción al lado derecho. La siguiente expresión define el Teorema de Bernoulli incluyendo estos dos términos.

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + P_p = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot \rho \cdot g$$

La presión de la bomba se obtiene de la hoja técnica:  $P_p = 55 \text{ psi} = 379\,211,25 \text{ Pa}$

Para calcular la pérdida de carga en la tubería se hace uso de la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$h = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

En función del caudal la expresión queda de la siguiente forma:

$$h = 0,0826 \cdot f \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5}\right) \cdot L$$

En donde:

h: pérdida de carga o de energía (m)

f: coeficiente de fricción (adimensional)

L: longitud de la tubería (m)

D: diámetro interno de la tubería (m)

v: velocidad media (m/s)

g: aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

Q: caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

El coeficiente de fricción  $f$  es función del número de Reynolds ( $Re$ ) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería ( $\varepsilon_r$ )

$$f = f(Re, \varepsilon_r); \quad Re = D \cdot v \cdot \frac{\rho}{\mu}; \quad \varepsilon_r = \varepsilon/D$$

De cálculos anteriores se obtuvo que el número de Reynolds es

$$Re = 14\,946,74$$

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

Tabla 37.

Rugosidad absoluta de materiales

Material	$\varepsilon$ (mm)	Material	$\varepsilon$ (mm)
<b>Plástico (PE, PVC)</b>	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
<b>Poliéster reforzado con fibra de vidrio</b>	0,01	Fundición	0,12-0,60
<b>Tubos estirados de acero</b>	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
<b>Tubos de latón o cobre</b>	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
<b>Fundición revestida de cemento</b>	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
<b>Fundición con revestimiento bituminoso</b>	0,0024	Madera	0,18-0,90
<b>Fundición centrifugada</b>	0,003	Hormigón	0,3-3,0

(Miliarium, 2104)

La tubería es de PE por lo que se utiliza una rugosidad absoluta de 0,0015 mm, y el diámetro interior es de 16,1mm.

$$\varepsilon_r = \frac{0,0015 \text{ mm}}{16,1 \text{ mm}}$$

$$\varepsilon_r = 93,1677 \times 10^{-6}$$

Para el cálculo de  $f$  se utiliza el diagrama de Moody. Moody consiguió representar la expresión de Colebrook-White en un ábaco de fácil manejo para calcular “ $f$ ” en función del número de Reynolds ( $Re$ ) y actuando la rugosidad relativa ( $\epsilon_r$ ) como parámetro diferenciador de las curvas.

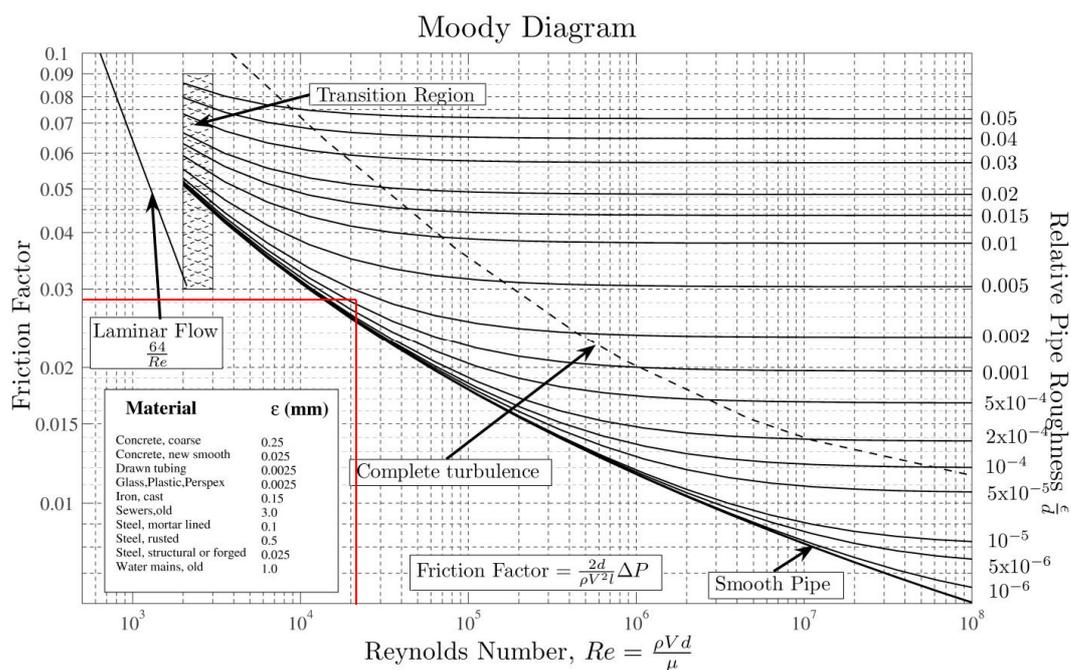


Figura 39. Diagrama de Moody  
(Física.laguia2000, 2012)

El factor de fricción resultante del diagrama de Moody es  $f = 0,028$ , sustituyendo los valores correspondientes en la fórmula de Darcy obtenemos:

$$h = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

Para el tramo de tubería que va del tanque B al tanque A:

$$h = 0,028 \cdot \left(\frac{1,5m}{0,0161m}\right) \cdot \left(\frac{\left(0,9284 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)}\right)$$

$$h = 0,115m$$

Para el tramo de tubería que va del tanque A al tanque B:

$$h = 0,028 \cdot \left( \frac{0,6m}{0,016m} \right) \cdot \left( \frac{\left( 0,9283 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot \left( 9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h = 0,0461m$$

Además de las pérdidas de carga por rozamiento, se producen otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas, etc.) y que se deben a fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse de función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico (K):

$$h = K \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

En donde:

h: pérdida de carga o de energía (m)

K: coeficiente empírico (adimensional)

v: velocidad media del flujo (m/s)

g: aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El coeficiente “K” depende del tipo de singularidad y de la velocidad media en el interior de la tubería. En la siguiente tabla se resumen los valores aproximados de “K” para cálculos rápidos:

Tabla 38.

Valores del coeficiente K en pérdidas singulares

Accidente	K	L/D
<b>Válvula esférica (totalmente abierta)</b>	10	350
<b>Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)</b>	5	175
<b>Válvula de seguridad (totalmente abierta)</b>	2,5	-
<b>Válvula de retención (totalmente abierta)</b>	2	135
<b>Válvula de compuerta (totalmente abierta)</b>	0,2	13
<b>Válvula de compuerta (abierta 3/4)</b>	1,15	35
<b>Válvula de compuerta (abierta 1/2)</b>	5,6	160
<b>Válvula de compuerta (abierta 1/4)</b>	24	900
<b>Válvula de mariposa (totalmente abierta)</b>	-	40
<b>T por salida lateral</b>	1,80	67
<b>Codo a 90° de radio corto (con bridas)</b>	0,90	32
<b>Codo a 90° de radio normal (con bridas)</b>	0,75	27
<b>Codo a 90° de radio grande (con bridas)</b>	0,60	20
<b>Codo a 45° de radio corto (con bridas)</b>	0,45	-
<b>Codo a 45° de radio normal (con bridas)</b>	0,40	-
<b>Codo a 45° de radio grande (con bridas)</b>	0,35	-

(Miliarium, 2104)

Para realizar los cálculos de pérdidas en los tramos de tubería del Sistema Modular, se toman los valores de la tabla y se impone un valor  $K=1$  para el sensor de caudal.

En el tramo de tubería que va del tanque B al tanque A se encuentran los siguientes accesorios:

Tabla 39.

Accesorios tramo 1

Accesorio	Cantidad	Coefficiente K
<b>Codo 90° radio corto</b>	6	0,9
<b>Válvula check</b>	1	2
<b>Válvula de compuerta (electroválvula)</b>	1	0.2
<b>Sensor de caudal</b>	1	1
<b>T</b>	1	1,80

Realizando la sumatoria de los coeficientes K, se calcula la pérdida total por accesorios en este tramo:

$$h = K \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h = 10.4 \cdot \left( \frac{\left( 0,9283 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left( 9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h = 0,4568 \text{ m}$$

En el tramo de tubería que va del tanque A al tanque B se encuentran los siguientes accesorios:

Tabla 40.

Accesorios tramo 2

Accesorio	Cantidad	Coefficiente K
<b>Codo 90° radio corto</b>	2	0,9
<b>Electroválvula</b>	1	0.2

Realizando la sumatoria de los coeficientes K, se calcula la pérdida total por accesorios en este tramo:

$$h = K \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h = 2 \cdot \left( \frac{\left( 0,9283 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left( 9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h = 0,088 \text{ m}$$

Con los datos obtenidos se puede calcular la pérdida de carga total para cada tramo; y al aplicar el teorema de Bernoulli se obtendrá la velocidad al final de la tubería y por tanto el régimen de flujo en ese punto.

Para el tramo que va desde el Tanque B al tanque A se tiene:

$$h_T = h_R + h_A$$

$$h_T = 0,115 \text{ m} + 0,4568 \text{ m}$$

$$h_T = 0,5718 \text{ m}$$

Aplicando el Teorema de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + P_p = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot \rho \cdot g$$

$$379\,211,25 \text{ Pa} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} \cdot V_2^2 + \frac{1000 \text{ Kg}}{m^3} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{s^2} \cdot (0,3 \text{ m} + 0,5718 \text{ m})$$

$$v_2 = 0,2707 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0,0161 \text{ m} \cdot 0,2707 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 4358,54$$

Para el tramo que va desde el Tanque A al tanque B se tiene:

$$h_T = h_R + h_A$$

$$h_T = 0,51 \text{ m} + 0,0461 \text{ m}$$

$$h_T = 0,5561 \text{ m}$$

Aplicando el Teorema de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + P_p = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot \rho \cdot g$$

$$379\,211,25 \text{ Pa} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot V_2^2 + \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot (0,5561 \text{ m})$$

$$v_2 = 0,2734 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0,0161 \text{ m} \cdot 0,2734 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,001 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$Re = 4401,84$$

En los dos tramos se obtiene un régimen de flujo turbulento, cuando la bomba esta actuando a su máxima potencia, con lo que se concluye que el sistema modular didáctico para el control de presión, caudal, nivel y temperatura opera en regimenes que van desde laminar, pasando por la zona de transición hasta terminar en régimen turbulento.

### 3.2.5. Dimensionamiento y Selección de materiales de los Depósitos

Los tanques para el sistema modular cumplen con tres principales requerimientos, permiten la visualización del fluido durante todo el proceso de control, soportan la presión del fluido y no sufre deformaciones con temperaturas que van entre los 20°C y los 80°C.

El material que se adapta a nuestros requerimientos es el acrílico transparente; su facilidad para ser moldeado y sus propiedades físicas hacen de este material el óptimo para el sistema modular didáctico.

El acrílico soporta entre 80 y 85°C de temperatura continua; el acrílico no pigmentado es tan transparente como el cristal más fino, su tasa de transmisión de luz es del 92%; El módulo de elasticidad a la tracción es de 32 kg/cm<sup>2</sup> según la norma ASTM D-638 y el Módulo de flexión es de 28 600 kg/cm<sup>2</sup> bajo la norma ASTM D-790.

Tabla 41.

Tabla de propiedades del acrílico

TABLA DE PROPIEDADES						
Propiedades mecánicas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	IGNIFUGO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Tracción						
Resistencia en el límite elástico	kg/cm <sup>2</sup>	D-638				
Resistencia a la rotura	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	562-773	492-773	562-878	386
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	5,0	
Módulo de elasticidad	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	24.600-31.000	23000-31.000	26.600-33.700	
Flexión						
Resistencia en el límite elástico o rotura	kg/cm <sup>2</sup>	D-790	840-1.300	740-1.300	840-1.250	562
Módulo de elasticidad	kg/cm <sup>2</sup>	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	24.600-31.600	17.500
Compresión						
Resistencia a la compresión(ruptura)	kg/cm <sup>2</sup>	D-695	773-1.330	740-1260	773-840	
Módulo de compresión	kg/cm <sup>2</sup>	D-695	27.500-33.300	26.000-32.300	31.000	
Impacto						
Resistencia al impacto IZOD	kg/cm <sup>2</sup>	D-256 A	1,9	2,4	1,9	6,52
Dureza						
Rockwell		D-795	M-80-M-100	M-68 M-105	M-61 - M100	R-99

CONTINUA 

<b>Barcol</b>		D-2583	50	50	45	35
<b>Propiedades Térmicas</b>						
<b>Coefficiente de dilatación lineal</b>	cm/cm°C	D-696	6,0 X 10A LA MENOS 5	1,3 X 10A LA MENOS 5		
<b>Temperatura de deflexión bajo carga</b>	18'6kg/cm2	D-648	86°C	68-96°C	82 °C	
<b>Conductividad Térmica</b>	10 A LA MENOS 4 cal cm/sec cm2 °C	C-177	4,0-6,0	4,0-6,0		
<b>Calor específico</b>	cal/g°C		0,35	0,3	0,35	
<b>Propiedades físicas</b>						
<b>Peso específico</b>	g/cm3	D-792	1,19-1,20	1,19-1,20	1,23	1,15
<b>Absorción de agua</b>	%	D-570	0,2-0,4	0,1-0,4	0,63	0,4
<b>Propiedades eléctricas</b>						
<b>Resistencia eléctrica</b>	ohm/cm	D-257	>10 A LA SEXTA	>10 A LA SEXTA	>10 A LA SEXTA	
<b>Rigidez dieléctrica</b>	Kv/mm	D-149	19	17	16	
<b>Propiedades ópticas</b>						
<b>Índice de refracción</b>		D-542	1,49	1,49	1,5	1,49
<b>Transmitancia</b>	%	D-791	92	92	92	90
<b>Nubosidad (Haze)</b>	%	D-1003	1	1	1	4
<b>Propiedades químicas</b>						
<b>Resistencia a la intemperie</b>			Excelente	Excelente	Amarillea	Excelente
<b>Resistencia a los ácidos débiles</b>			No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
<b>Resistencia a los ácidos fuertes</b>			No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
<b>Resistencia a los álcalis débiles</b>			No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
<b>Resistencia a los álcalis fuertes</b>			Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado
<b>Ácidos Oxidantes</b>			Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado
<b>Resistencia a los solventes</b>					Son atacados por cetonas, ésteres.	

(Acrílico y Policarbonato, 2015)

Las dimensiones que se establecen para los depósitos son:

Tabla 42.

Dimensiones Generales de los Tanques

TANQUE	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	PROFUNDIDAD (cm)	VOLUMEN TOTAL (cm <sup>3</sup> )
A	60	30	30	54 000
B	30	50	50	75 000

Para calcular el esfuerzo que soportan las paredes del tanque, calculamos el peso que ejerce el agua sobre las paredes del tanque:

Tanque A:

- Peso del agua =  $\rho * g * h * A$
- Dónde:
- $\rho$ : densidad del fluido (agua)
- g: gravedad
- h: altura del líquido
- A: Área del fondo
- Peso máximo del agua =  $1000 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.6 \text{ m} * (0.3 * 0.3) \text{ m}^2$
- Peso máximo del agua = 529.74 N

Con el valor del Peso del agua, calculamos el esfuerzo que ejercen sobre las paredes, considerando que el espesor del acrílico es de 3mm.

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

$$\text{Esfuerzo máximo en paredes} = \frac{529.74 \text{ N}}{0.03 * 0.3 \text{ m}^2}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en paredes} = 58\,860 \text{ N/m}^2$$

De la tabla de propiedades del acrílico, tenemos que la resistencia en el límite elástico es de  $856\,269 \text{ N/m}^2$  con este valor tenemos un factor de seguridad de:

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

$$FS = \frac{856\,269}{58\,860}$$

$$FS = 14.48$$

Realizando los mismos cálculos para el tanque B obtenemos:

Tanque B:

- Peso del agua =  $\rho \cdot g \cdot h \cdot A$
- Peso máximo del agua =  $1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.3 \text{ m} \cdot (0.5 \cdot 0.5) \text{ m}^2$
- Peso máximo del agua =  $735.75 \text{ N}$

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

$$\text{Esfuerzo máximo en paredes} = \frac{735.77 \text{ N}}{0.03 \cdot 0.5 \text{ m}^2}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en paredes} = 49\,051.33 \text{ N/m}^2$$

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

$$FS = \frac{856\,269}{49\,051.33}$$

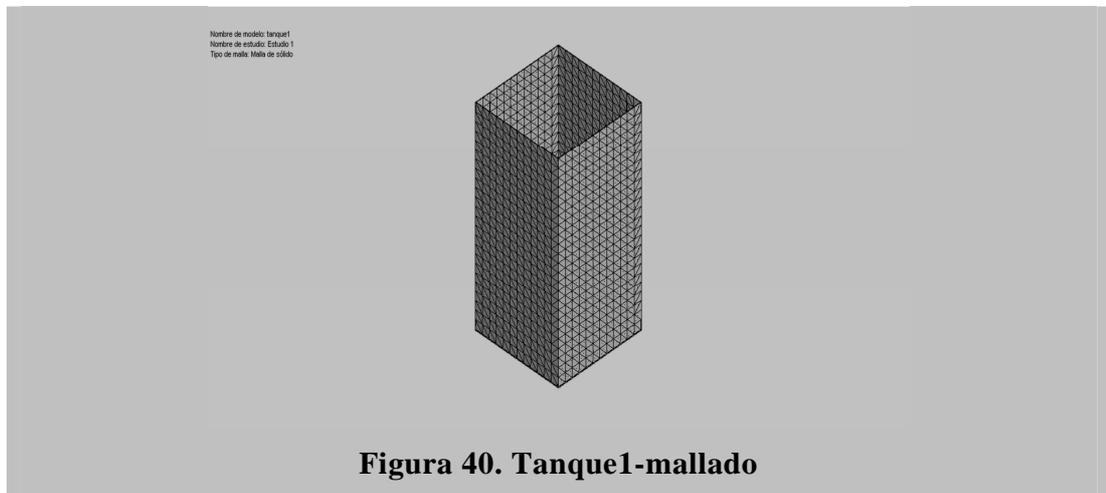
$$FS = 17.46$$

Con los resultados obtenidos se concluye que con los tanques totalmente llenos, el material no fallará por tracción.

Se incluye un estudio CAD de los depósitos:

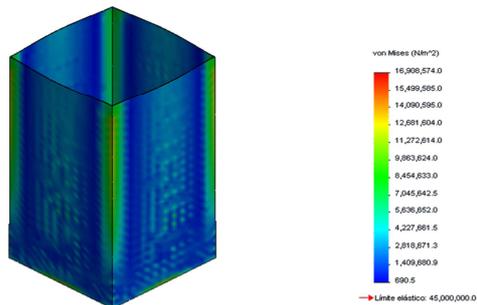
Se incluye un estudio CAD de los depósitos, en el cual se utiliza análisis de elementos finitos con la ayuda de software de diseño SolidWorks, las características del mallado y los resultados de los estudios se detallan a continuación.

Tipo de malla	Malla sólida
Tamaño de elementos	25.4557 mm
Tolerancia	1.27279 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	16445
Número total de elementos	8240

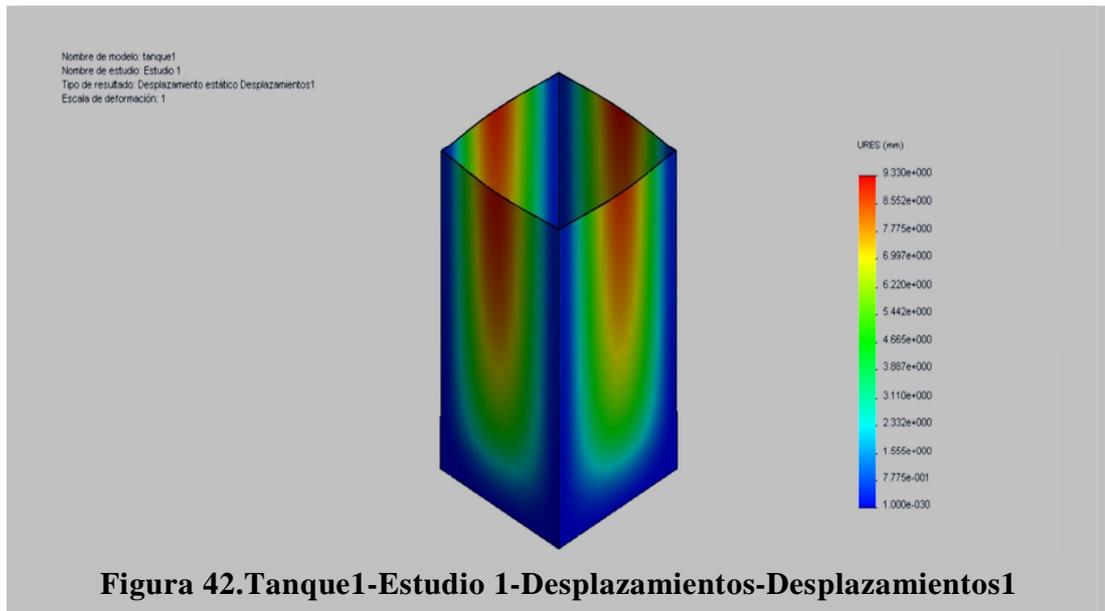


Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Tensiones1</b>	VON: Tensión de von	690.507 N/m <sup>2</sup>	1.69086e+003 N/m <sup>2</sup>
	Mises	Nodo: 933	Nodo: 1986

Nombre de modelo: tanque1  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1  
Escala de deformación: 1

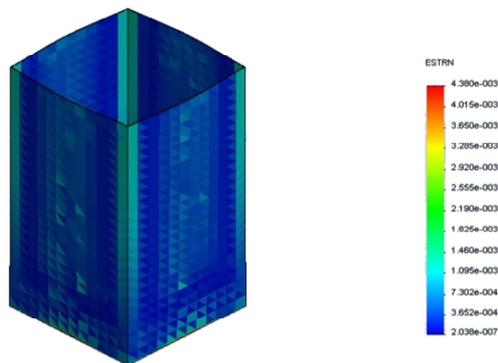


Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Desplazamientos1</b>	URES:	0 mm	6.037e-003 mm
	Desplazamiento resultante	Nodo: 101	Nodo: 16171

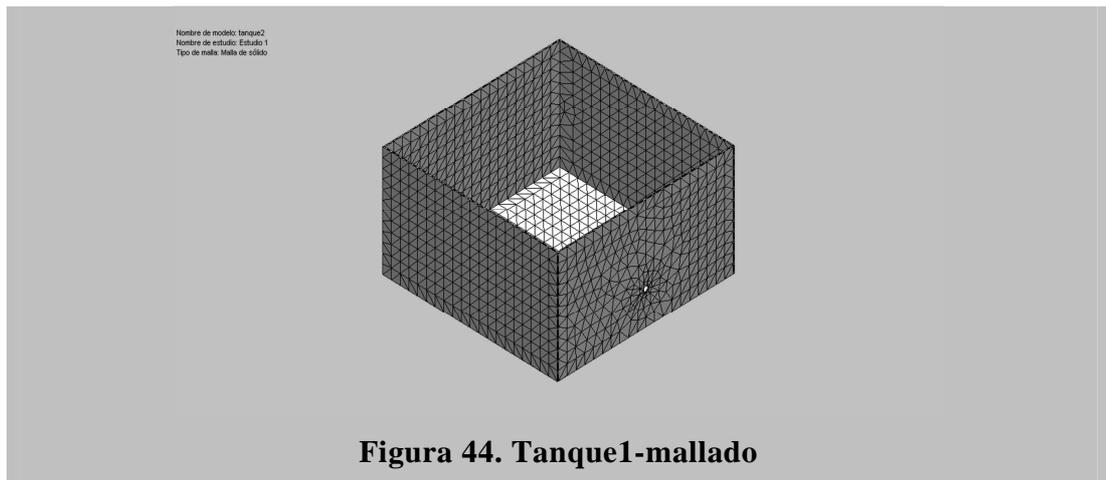


Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Deformaciones unitarias1</b>	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.03805e-007	0.00437998 e-003
		Elemento: 50	Elemento: 908

Nombre de modelo: tanque1  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1  
Escala de deformación: 1

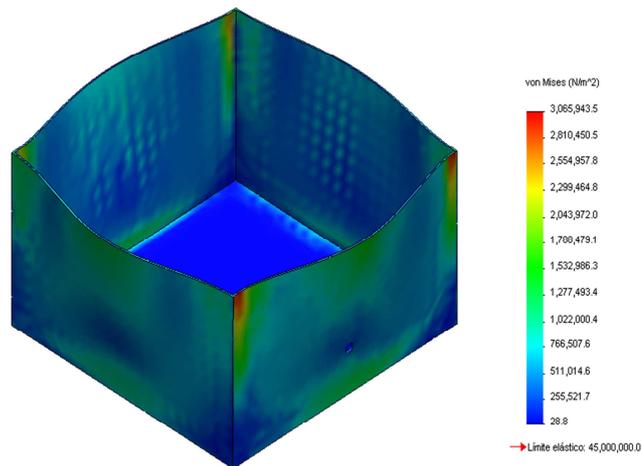


Tipo de malla	Malla sólida
Tamaño de elementos	26.1757mm
Tolerancia	1.30878 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	16285
Número total de elementos	8079



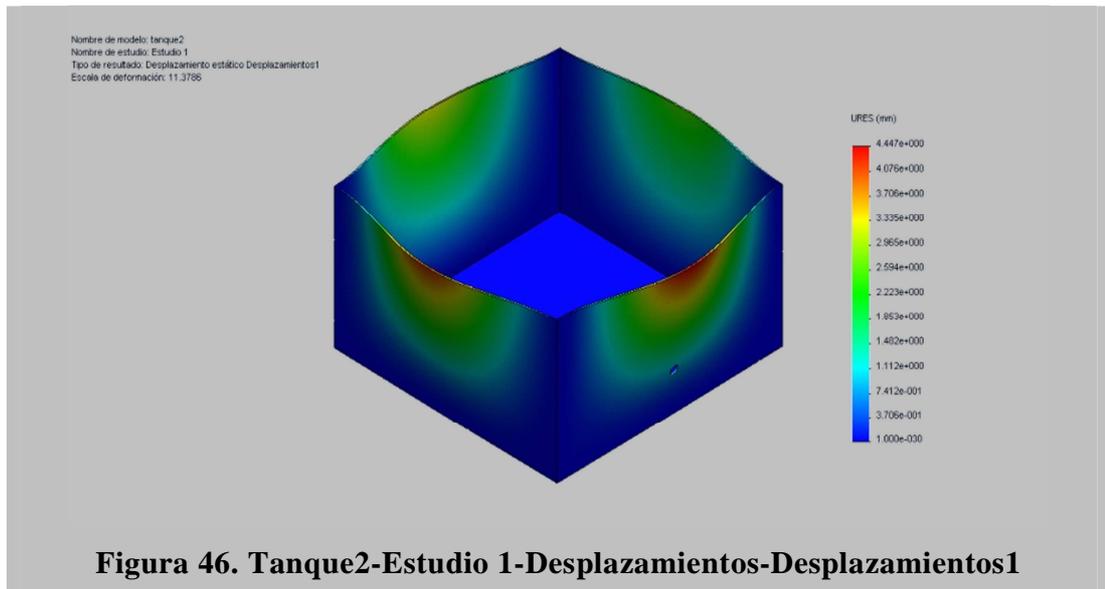
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Tensiones1</b>	VON: Tensión de von	28.844 N/m <sup>2</sup>	0.30659e+003 N/m <sup>2</sup>
	Mises	Nodo: 6950	Nodo: 29

Nombre de modelo: tanque2  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Stático: tensión nodal Tensiones1  
Escala de deformación: 11.3786

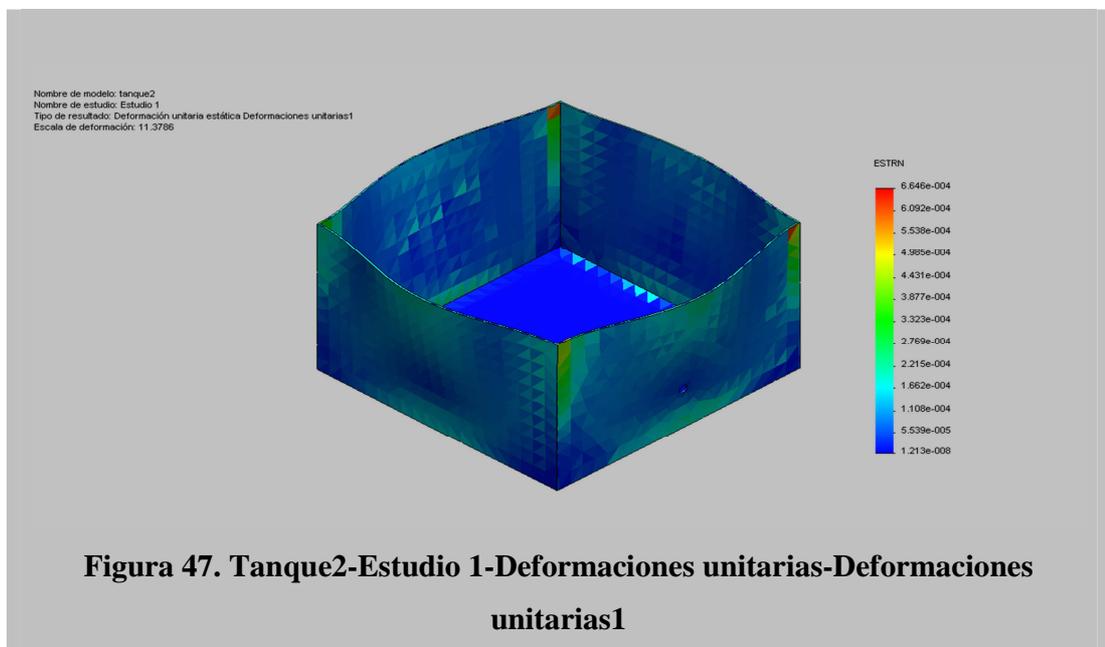


**Figura 45. Tanque2-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1**

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Desplazamientos1</b>	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 17	4.44694e-003 mm Nodo: 10582



<b>Deformaciones unitarias1</b>	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.21279e-008 Elemento: 611	0.000664602 Elemento: 1465
---------------------------------	---	-------------------------------	-------------------------------



### 3.2.6. Dimensión y Análisis Estático del Bastidor

#### 3.2.6.1. Diseño y Planos del Banco Bastidor de Montaje Cad

Las dimensiones del bastidor se asignan partiendo de la dimensión de los depósitos y el uso didáctico del módulo, el bastidor permite alojar todos los subsistemas por lo que se proponen las siguientes dimensiones para la base:

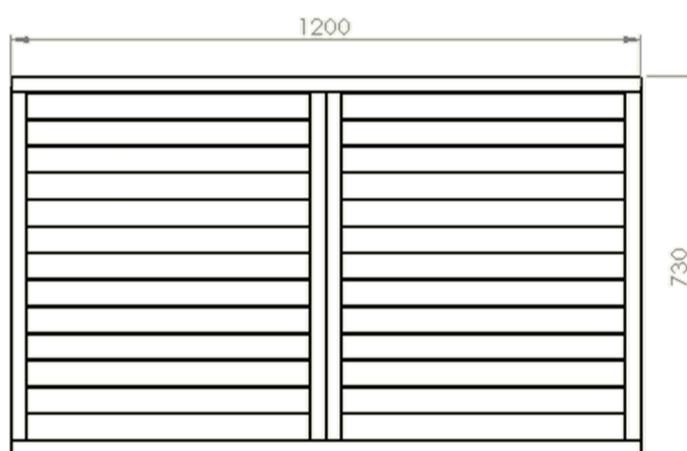


Figura 48. Dimensiones base de la mesa

Otro factor que se considera es la ergonomía del estudiante, el módulo permite que el estudiante visualice los cambios que sufre el fluido durante el proceso, por lo que la base se ubica a 0.70 m del suelo. Los elementos eléctricos se ubican sobre tres barras transversales en la parte posterior del bastidor, la estructura posterior queda como se muestra en la Figura 19.

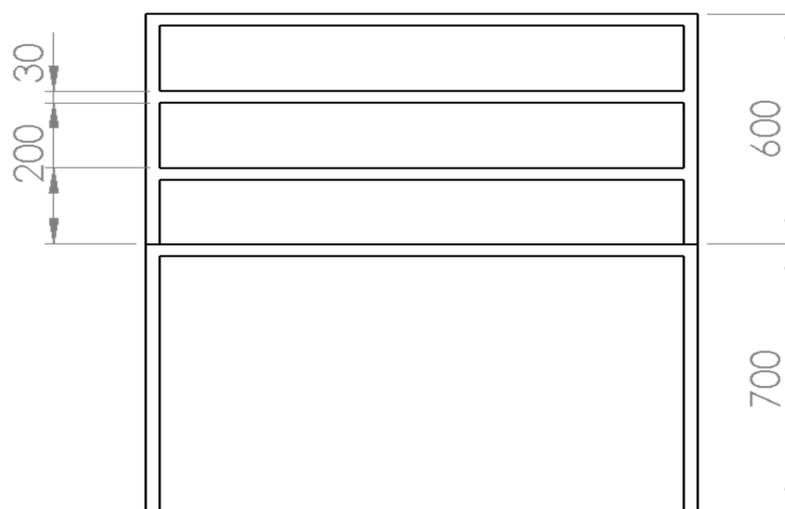


Figura 49. Dimensiones parte posterior bastidor

El tanque A debe estar elevado 20 cm sobre el tanque B, por lo que se incorpora una estructura pequeña sobre la mesa, las dimensiones de esta estructura se muestran en la Figura 20.

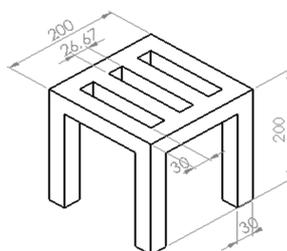


Figura 50. Dimensiones estructura para Tanque A

Otro aspecto importante en el diseño del bastidor es la ubicación de los sensores, los sensores de caudal y presión se montan en el sistema de tuberías, y el sensor de temperatura directamente en el tanque B; el sensor de nivel se coloca en la parte superior del tanque A, lo que hace necesario diseñar un soporte anclado a la mesa, el cual ubica al sensor sobre el tanque. Las dimensiones del soporte para el sensor de nivel se muestran en la Figura 21.

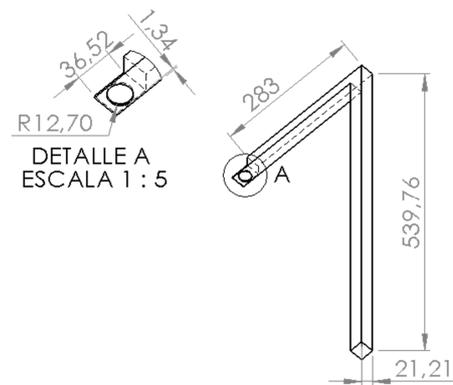


Figura 51. Ilustración 4 Dimensiones soporte para Sensor de Nivel

Como ultimo detalle, se añaden nervios entre la base y las patas del bastidor, para una mejor estabilidad; con todos estos detalles el bastidor queda así:

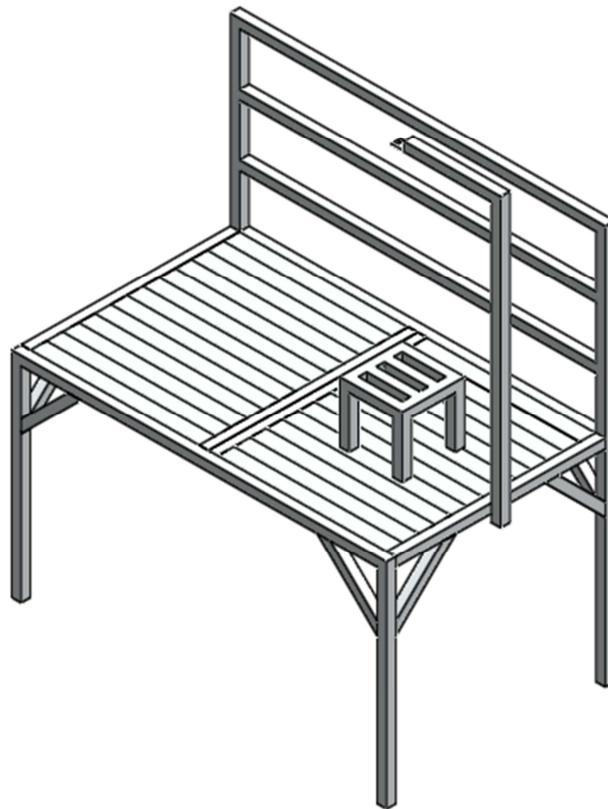


Figura 52. Bastidor de montaje

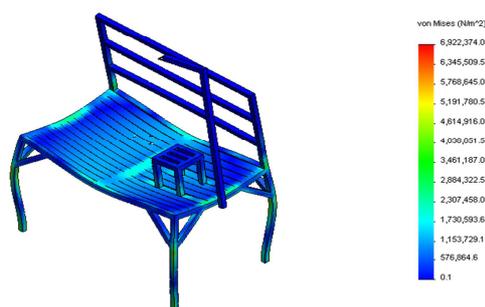
Se incluye un estudio CAD del bastidor de montaje

Tipo de malla	Malla sólida
Tamaño de elementos	42.0042mm
Tolerancia	2.10021 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	17366
Número total de elementos	7429

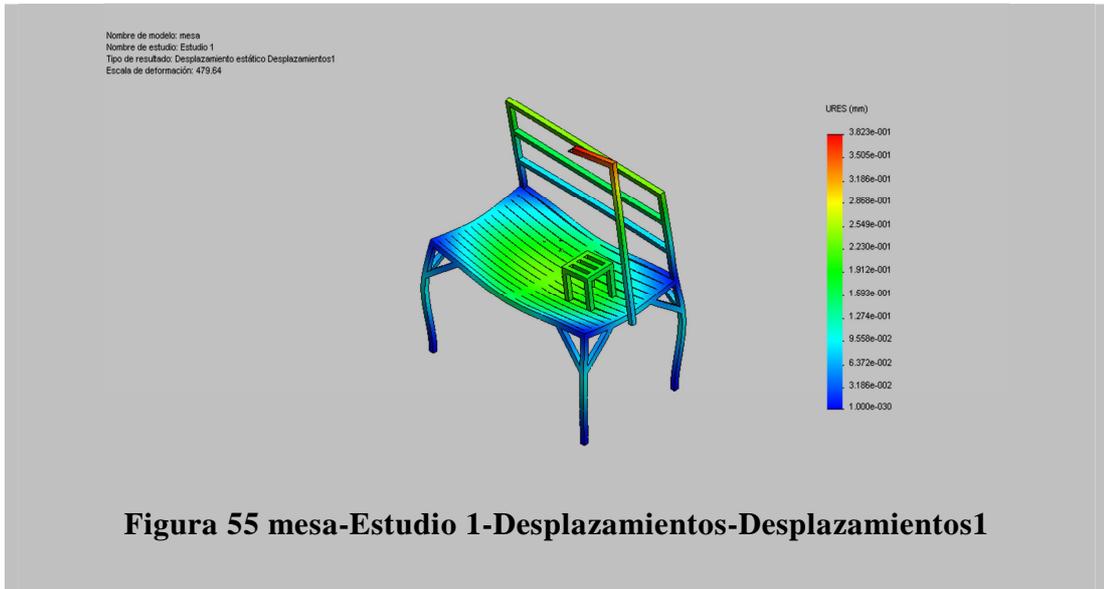


Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones I	VON: Tensión de von	0.120373 N/m <sup>2</sup>	6.92237e+006 N/m <sup>2</sup>
	Mises	Nodo: 1400	Nodo: 5445

Nombre de modelo: mesa  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Stático: tensión nodal Tensiones1  
Escala de deformación: 479.64



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm	0.382336 mm
		Nodo: 4320	Nodo: 927



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	6.87246e-013	3.78824e-005
		Elemento: 474	Elemento: 3428

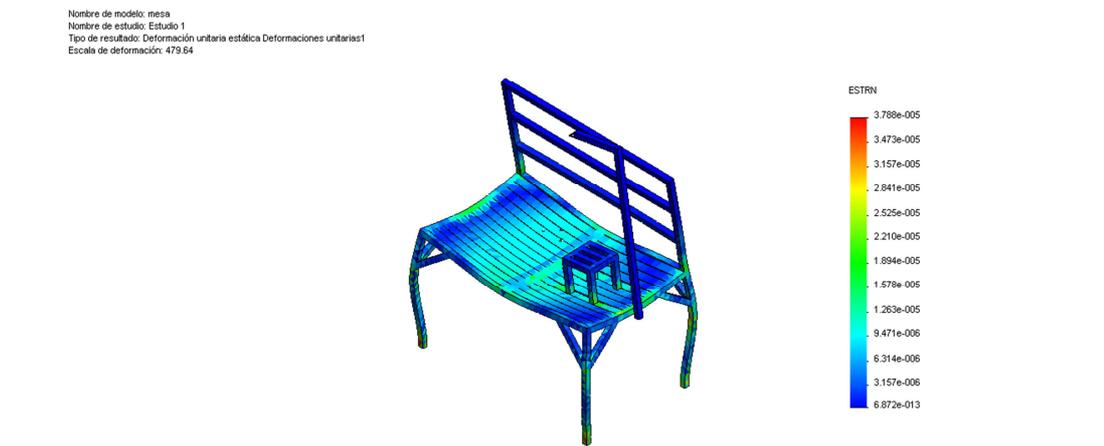


Figura 56. Mesa-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

### **3.3. Eléctrico/ Electrónico**

#### **3.3.1. Selección de Elementos**

##### **3.3.1.1. Dimensionamiento y Selección de Sensores y Actuadores**

Debido a que los sensores y actuadores que se utilizan en la construcción del Sistema Modular Didáctico son de uso industrial en el mercado se encuentran sensores y actuadores robustos y con rangos de trabajo altos lo cual no es adecuado en este caso. Por dicha razón se usan instrumentos didácticos que tienen rangos y dimensiones adecuados pero son poco comunes en el mercado.

##### **Sensor de Nivel**

El primer sensor que se analiza es el sensor de nivel, las características y requerimientos principales del sensor de distancia de ultrasonidos son:

- Necesita un diámetro mínimo de trabajo de 20 cm.
- El rango de medición va desde los 2 cm hasta los 4 m, distancias inferiores o superiores a este rango provocan lecturas erróneas.

Tomando en cuenta esto, se eligen las medidas del tanque para control de nivel, el cual tendrá como mínimo un radio de 20 cm.

La construcción de tanques cilíndricos conlleva una alta complejidad por lo que se decide construir un tanque prismático de construcción más sencilla y funcionalidad adecuada para el sistema modular didáctico, las dimensiones de la base son 30\*30cm. cumpliendo el requisito de diámetro mínimo y se otorga un factor de seguridad que asegura fidelidad en la lectura del sensor de nivel, el sistema modular es de uso didáctico y la visualización de un incremento o decremento del nivel es primordial por tanto la altura del tanque será de 60cm, con esto queda dimensionado el tanque A.

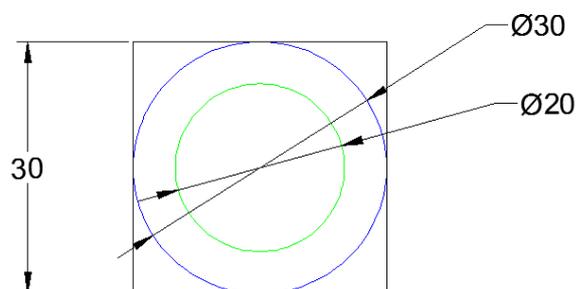


Figura 57. Cálculo Base Tanque A

Tabla 43.

Dimensiones Tanque A

TANQUE A
$V = 30cm * 30cm * 60cm = 54000cm^3$

El tanque B es el tanque de almacenamiento, es necesario que tenga un volumen superior al del tanque A; por lo que sus dimensiones son:

Tabla 44.

Dimensiones tanque B

TANQUE B
$V = 50cm * 50cm * 30cm$ $= 75000cm^3$

### Bomba principal

Lo siguiente en seleccionar es la bomba que representa el actuador principal, por su facilidad de control se escoge una bomba con alimentación de 12 Vdc con control PWM.

La bomba seleccionada tiene una presión máxima de 55 PSI y un caudal de 3 GPM estos valores son los requerimientos para elegir los sensores de presión y caudal respectivamente.



**PUMP:**

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

**ELECTRICAL:**

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 58. Bomba seleccionada

(SHURFLO, 2011)

Para el uso de la bomba con regulación de PWM se utilizó una placa que nos permita enviar datos de PWM y los convirtiera en variación de voltaje, de esta manera tenemos la siguiente placa:

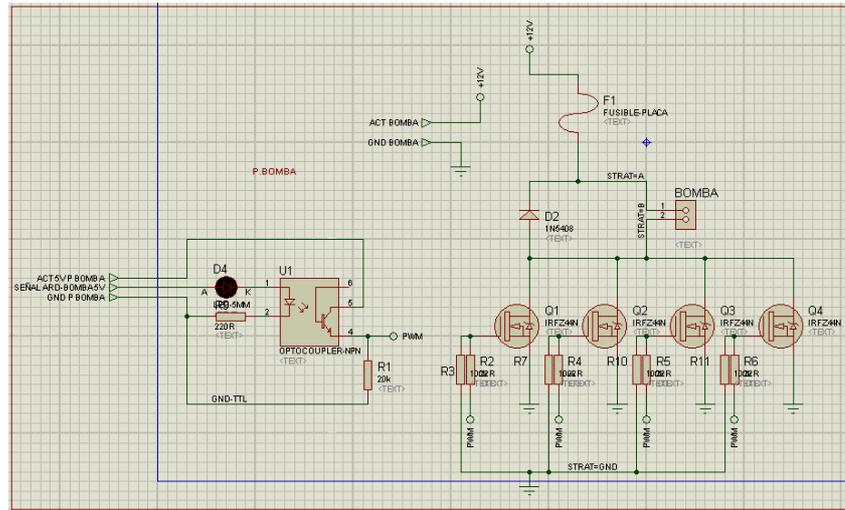


Figura 59. Placa de acondicionamiento de la señal para la Bomba principal

## Electroválvulas

Antes de elegir los sensores, para controlar el ingreso y la salida de agua a los tanques, se ubican electroválvulas de 24 VDC.



### 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:	Ø 2,5 mm	
Weight incl. packaging:	255 g	

Figura 60. Electroválvula

(Direct Industry, 2015)

Para el uso de las electroválvulas es necesario ampliar la señal de control dada por el arduino de 5VDC a 24 VDC, por lo que es necesario el uso de una placa de relés que nos permitan dicho acondicionamiento:

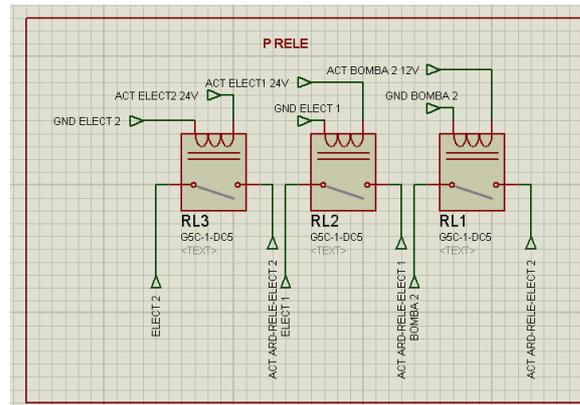


Figura 61. Placa de acondicionamiento de Electrválvulas

## Niquelina

Para la regulación de la temperatura vamos a usar una niquelina de 110VAC, esta níquelina calienta el tanque a 1°C por minuto.



Figura 62. Niquelina

(INOCOY, 2003)

Para el uso de esta niquelina se necesita un acondicionamiento para que mediante una activación dada por el arduino y se activará la niquelina de voltaje AC.

Para esto se usará la siguiente placa:

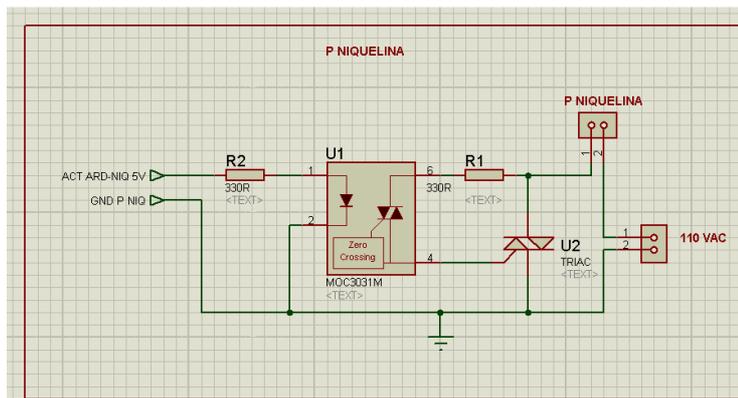


Figura 63. Placa de acondicionamiento para activación de Niquelina

### Sensor de Presión

El sensor de presión se selecciona a partir del rango de trabajo de la bomba, la presión máxima de la bomba es de 55 PSI, por tanto el rango del sensor seleccionado es 0-0.4 Mpa, que transformado a PSI es 0-58 PSI, que otorga un rango de medición adecuado para el sistema.

Rated load,	0~0.4~1.6MPa,
Rated output,	0.5~4.5V,
Accuracy,	±1.0%FS,
Operating Voltage,	5.0±0.5VDC,
Operating temperature range,	-40°C~+120°C,
Compensated temperature range,	0°C~+105°C,
Storage temperature range,	-40°C~+120°C,
Ultimate load,	200%F.S,
Long-term stability,	±1.5%FS/year,
Pressure cycles,	>100,000 times,
Protection class,	IP65,
Pressure connection,	G1/4,
Media can be measured,	No corrosive gas, water, oil etc.,,
Method connecting wire,	Red: E+, White: GND, Blue: S+,

Figura 64. Especificaciones del sensor de presión.

(Forun, 2012)

### Sensor de Caudal

El siguiente sensor a seleccionar es el sensor de flujo, la bomba alcanza un caudal máximo de 3GPM por tanto el sensor debe trabajar en este rango; el sensor seleccionado trabaja de 0.2-4 GPM rango que cubre la demanda de la bomba principal.



<b>Materials</b>	
<b>Body</b>	Glass Reinforced PPO (Noryl)
<b>Turbine</b>	PA Composite (Nylon)
<b>Axle</b>	316 Stainless Steel
<b>Bearings</b>	Delrin® (Polyoxymethylene, POM)
<b>Inlet/Outlet Ports</b>	3/8" NPT Male
<b>Pressure</b>	
<b>Operating</b>	200 PSIG
<b>Burst</b>	1000 PSIG
<b>Operating Temperature</b>	-4°F to 176°F (-20°C to 80°C)
<b>Viscosity</b>	32 to 81 SSU (1.8 to 16 Centistokes)
<b>Recommended Filtration</b>	< 50 Microns
<b>Input Power</b>	5 to 24 VDC @ 8mA
<b>Output (Hz)</b>	NPN Sinking Open Collector @ 25mA Maximum leakage current 10µA (5k to 30k Pull-Up Resistor Required)
<b>Accuracy</b>	±2% of reading
<b>Repeatability</b>	±0.5% of reading
<b>Electrical Connection</b>	3 ft PVC cable #22 AWG
<b>Approvals</b>	NSF Std. 61 listed

Figura 65. Sensor de Caudal

(Turboflow, 2012)

## Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura debe permitir medir temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta un máximo de 80°C, el sensor tipo PT100 cumple con el rango requerido.



Figura 66. Pt100

(TS LINE, 2012)

Para el acondicionamiento del sensor de temperatura es necesario hacer un arreglo de resistencias que nos permita tener como salida una variación de voltaje de 0 a 5 voltios de esta maneja la placa del acondicionamiento es:

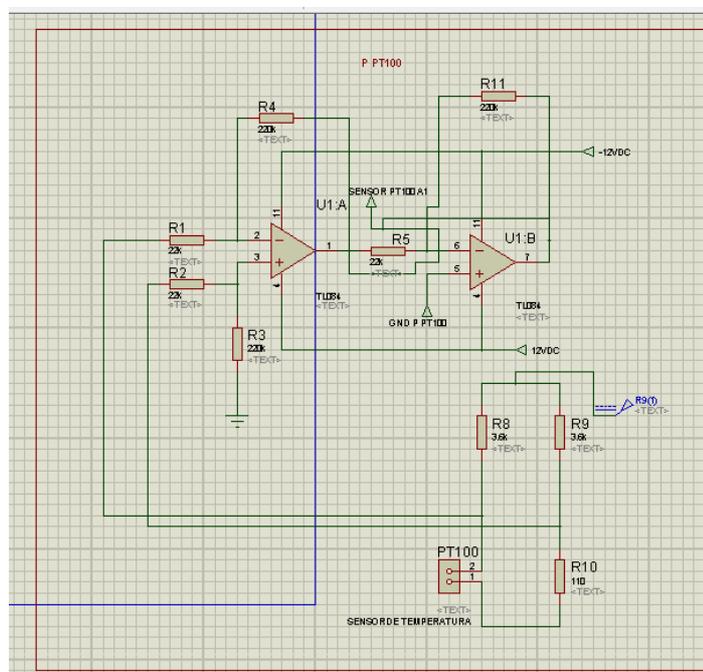


Figura 67. Circuito de Acondicionamiento del sensor de temperatura

## Controlador

Para realizar el control del sistema modular se selecciona la tarjeta arduino que es una plataforma electrónica abierta, ensamblada con microcontroladores ATMEGA y diseñada para la creación de prototipos, basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicarse con diferentes tipos de software.



Figura 68. Microcontrolador Arduino Mega  
(Arduino, 2015)

### 3.3.2. Instalaciones Eléctricas

Sin lugar a dudas, un equipo automatizado precisa del uso de un sistema eléctrico/electrónico, en donde el trabajo manual es reducido u omitido ofreciendo una producción más eficiente y disminución de riesgos al operador.

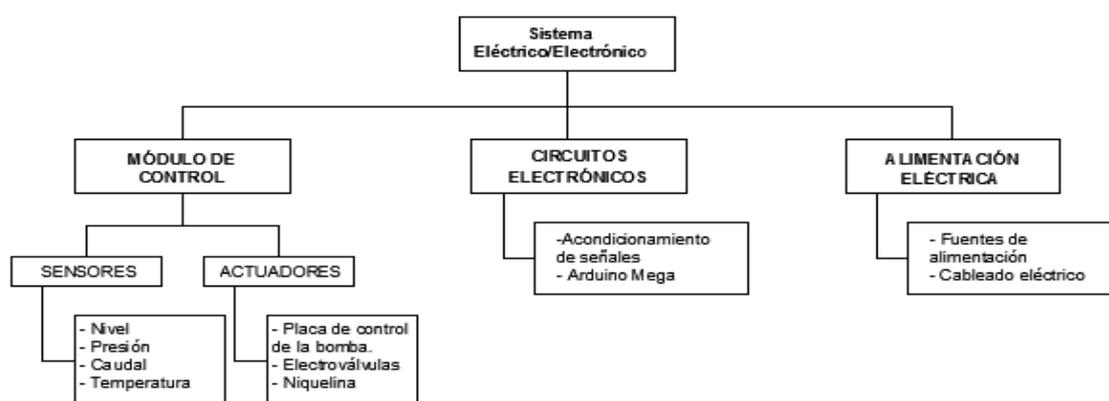


Figura 69. Elementos del sistema Eléctrico/Electrónico

- Módulo de Control

Posee elementos del sistema eléctrico/electrónico tales como sensores y actuadores. Como se debe realizar la interfaz entre la planta y controlador, los voltajes de alimentación de sensores y actuadores deben acoplarse al sistema de control con el que esté trabajando.

El sensor de nivel mide el nivel del tanque principal.

El sensor de presión mide la presión que se tiene en la tubería entre el tanque de almacenamiento y el tanque principal.

El sensor de caudal mide el caudal de entrada de agua al tanque principal.

El sensor de temperatura mide la temperatura que se tiene en el tanque secundario.

Las electroválvulas controlan el flujo de líquido y a su vez se rigen por los parámetros de control.

La bomba hace variación de su frecuencia y esta se varía por el controlador.

Circuitos Electrónicos permiten acoplar voltajes o corrientes, dependiendo de los requerimientos del proceso. Estos circuitos son necesarios debido a la dualidad del control del equipo y de los diferentes componentes electrónicos.

Alimentación eléctrica, el equipo va a conectarse directamente a la red eléctrica, pero los elementos no trabajan a 120V, por lo que son necesarias fuentes de poder con diferentes voltajes y amperajes.

El cableado de señales está basado en la placa principal del sistema modular didáctico, la placa arduino mega 2560 esta se alimenta con 12Vdc, otra placa arduino mega 2560 controla la pantalla de mando, las dos placas comparten la misma alimentación. A continuación se muestra la distribución de las señales del sistema modular didáctico en los pines de la placa principal:

Tabla 45.

Distribución de Señales

SENSOR / ACTUADOR	NOMBRE	E/S	TIPO	ETIQUETA
NIVEL	ECHO	E	PWM	8
	TRIGGER	E	PWM	9
CAUDAL	FLUJO	E	PWM	10
PRESIÓN	PRESIÓN	E	ANALOGICO	A0
TEMPERATURA	TEMP	E	ANALÓGICO	A1
ELECTROVÁLVULA	ELECV1	S	DIGITAL	51
	ELECV2	S	DIGITAL	53
BOMBA	BOMBA1	S	PWM	11
	BOMBA2	S	DIGITAL	49
PANTALLA	TX1	S	SERIAL	TX1
	RX1	E	SERIAL	RX1

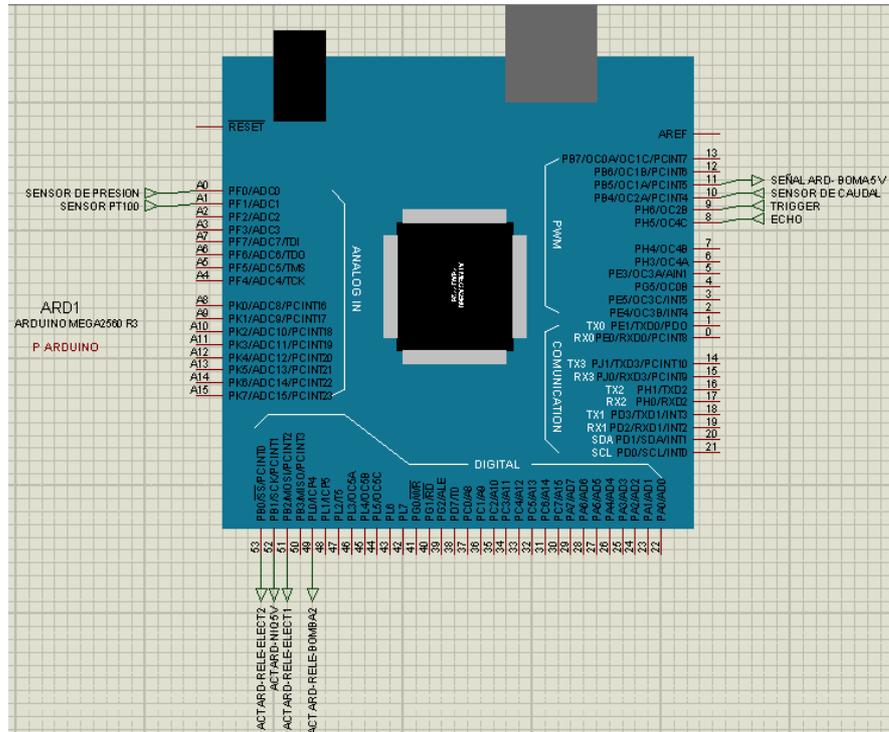


Figura 70. Cableado de señales

- Cableado Tablero de Control

El tablero de control está ubicado en la parte posterior del módulo el mismo que cumple con la norma IP54 protección contra polvo y humedad. El tablero contiene las placas de acondicionamiento de los sensores, y las placas de regulación de voltajes para los actuadores, además de la placa arduino principal.

La primera placa ubicada es la placa de activación de la niquelina:

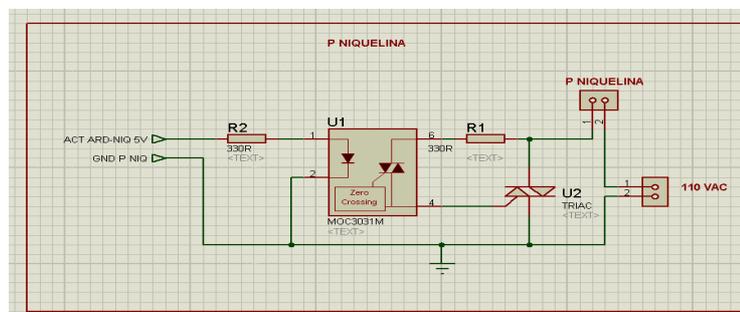


Figura 71. Placa de activación de niquelina

La segunda placa ubicada es la placa de activación de la bomba principal:

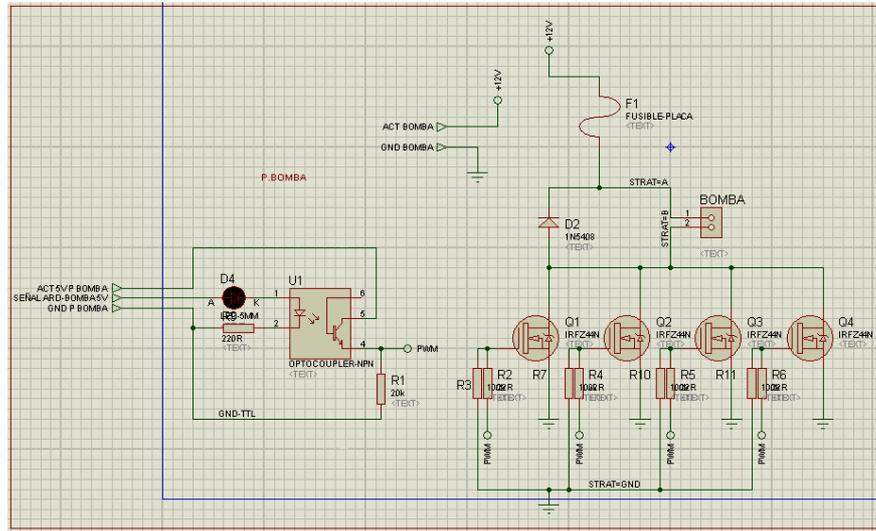


Figura 72. Placa de activacion Bomba principal

La tercera placa ubicada es el acondicionamiento del sensor de temperatura:

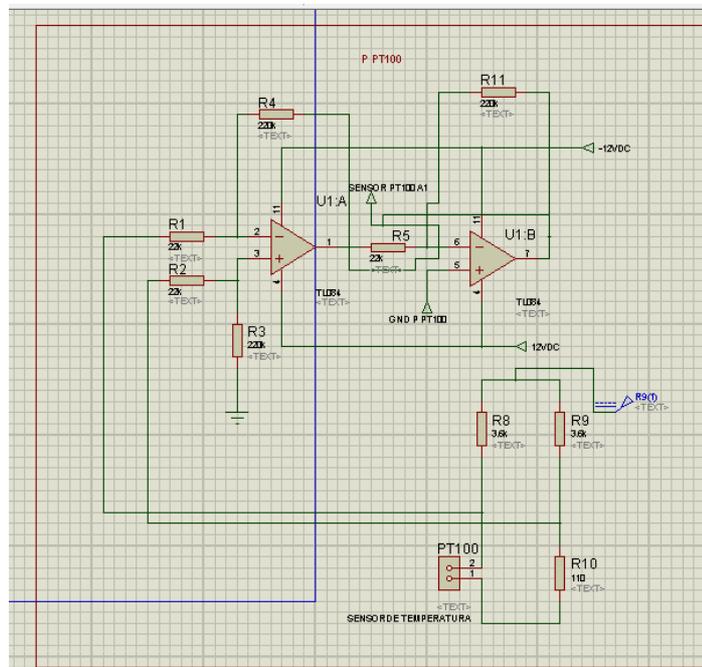


Figura 73. Placa de acondicionamiento sensor de temperatura

La cuarta placa ubicada es la placa de los relés de activación de la bomba secundaria, las electroválvulas primaria y secundaria, y de la niquelina:

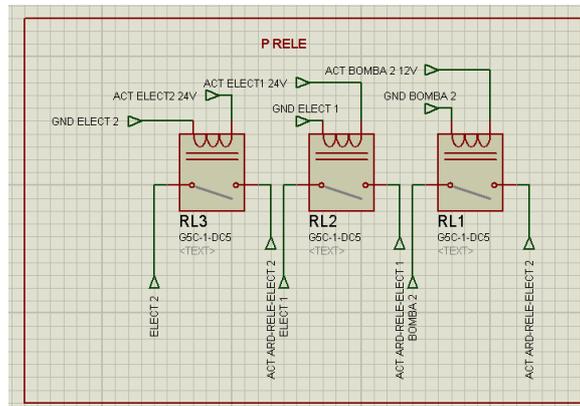


Figura 74. Placa de Relés de activación

La quinta placa ubicada es la placa arduino principal:

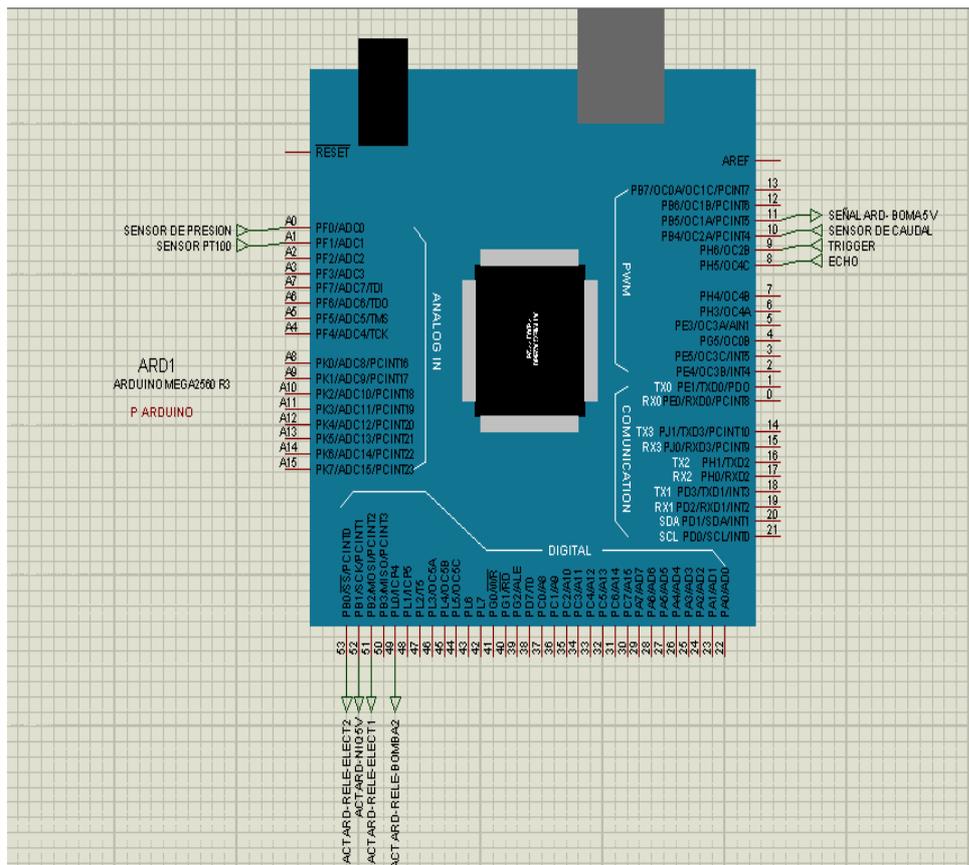


Figura 75. Placa de control arduino

La distribución completa del control de mando es:

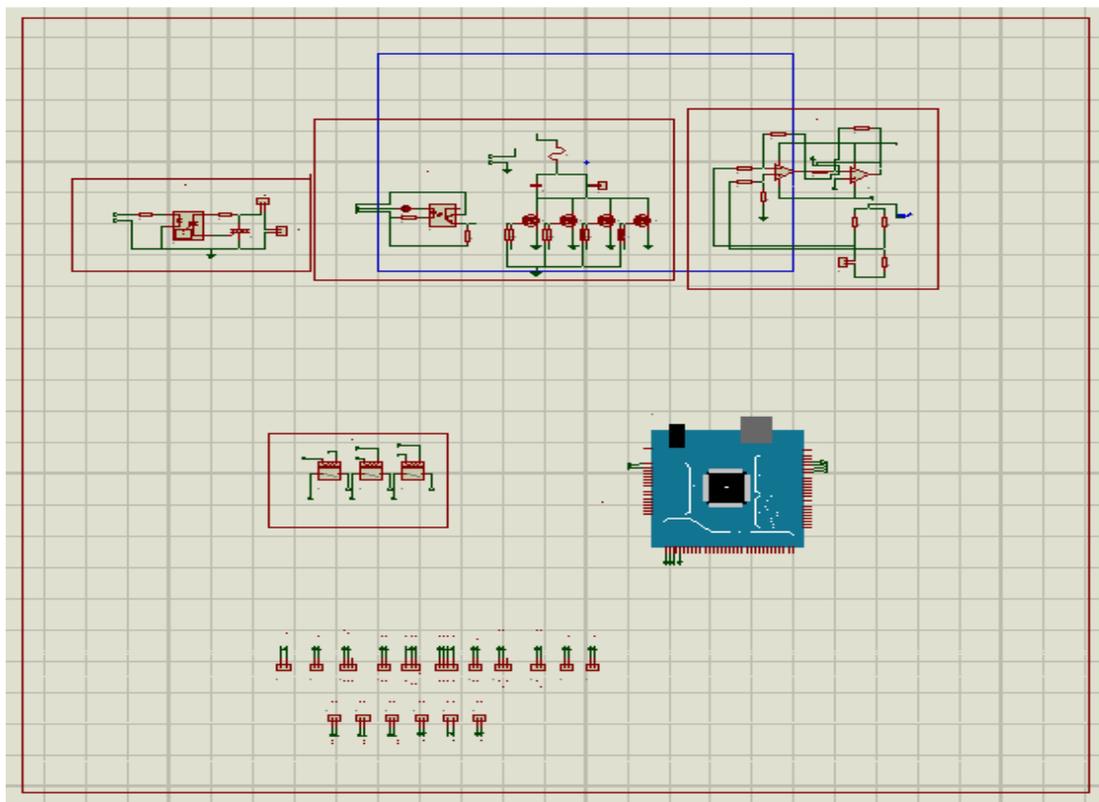


Figura 76. Esquema de circuito completo

### 3.4. Sistemas de control

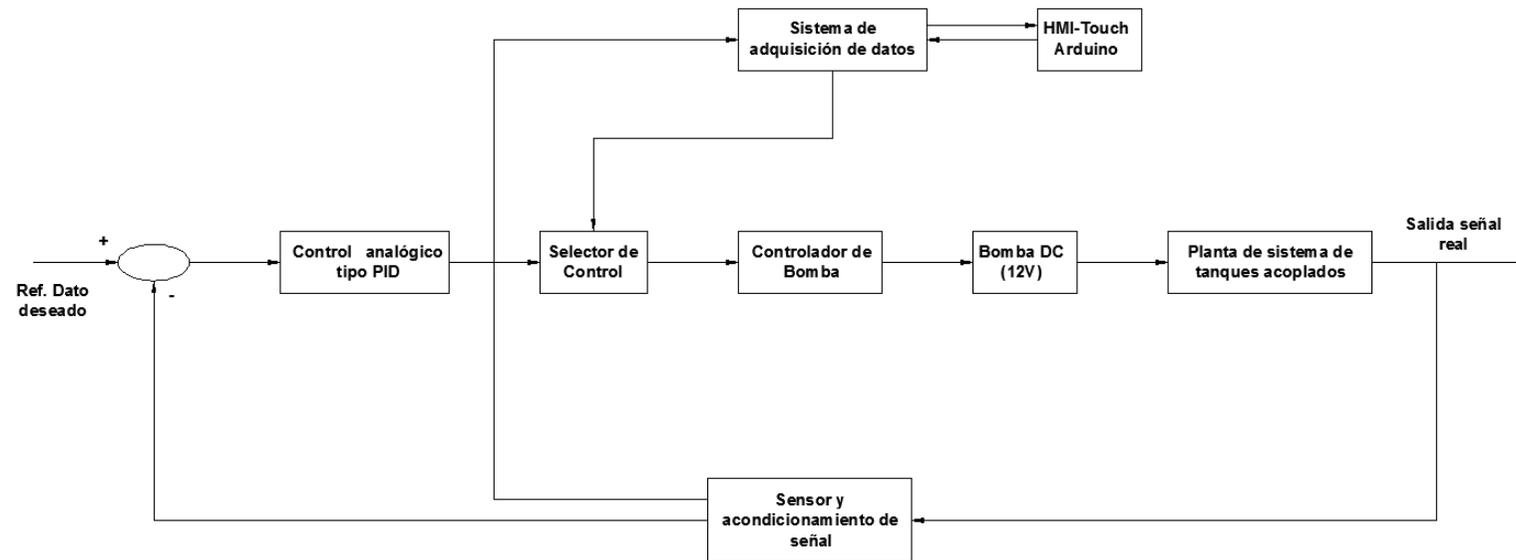


Figura 77. Diagrama de Bloques del Sistema de control

### 3.4.1. Parámetros de control

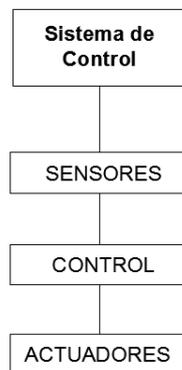


Figura 78. Elementos del sistema de control

Los parámetros son constantes arbitrarias que caracterizan por sus propiedades, el valor y la descripción dimensional de un sistema específico.

Los parámetros de un sistema son:

**Entrada:** es la fuerza de arranque del sistema que provee el material o la energía para la operación del sistema.

**Salida:** Es la finalidad para la cual se reunieron los elementos y relaciones del sistema. Los resultados de un proceso son las salidas, las cuales deben ser coherentes con el objetivo del sistema. Los resultados de los sistemas son finales, mientras que los resultados de los subsistemas son intermedios.

**Procesador:** es el fenómeno que produce cambios, es el mecanismo de conversión de las entradas en salidas o resultados.

**Retroalimentación:** es la función de retorno del sistema que tiende a comparar la salida con un valor preestablecido, manteniéndola controlada dentro de este criterio.

**Ambiente:** es el medio que envuelve externamente el sistema. Está en constante interacción con el sistema, ya que éste recibe entradas, las procesa y efectúa salidas. La supervivencia de un sistema depende de su capacidad de adaptarse, cambiar y responder a las exigencias y demandas del ambiente externo. Aunque el ambiente puede ser un recurso para el sistema, también puede ser una amenaza.

En nuestro caso vamos a diferenciar los parámetros para los cuatro sistemas que componen el Sistema Modular Didáctico.

- Nivel: La salida es la señal pwm que controla a la bomba hidráulica, y la entrada es el ancho de pulso de la señal de retorno del sensor ultrasónico, el cual varía con respecto al nivel de agua en el tanque.
- Caudal: La salida es la señal pwm que controla a la bomba hidráulica y la entrada es una señal de frecuencia de un tren de pulsos que varía respecto al caudal que pasa por la turbina del sensor de caudal.
- Presión: La salida es la señal pwm que controla a la bomba hidráulica y la entrada es una señal de voltaje que varía respecto a la deformación del diafragma del sensor de presión.
- Temperatura: La salida es el accionamiento de una niquelina que calienta el agua en el tanque de almacenamiento y la entrada es una señal resistiva que varía respecto a la temperatura del agua, esta señal es adecuada para obtener una señal de voltaje.

El procesador es la tarjeta Arduino Mega 2560, la tarjeta recibe las señales provenientes de los sensores en los cuatro procesos de regulación y envía las señales a los actuadores correspondientes, para recibir y enviar las señales se cuenta con tarjetas de adecuación de señales, las cuales tienen todas las protecciones necesarias para proteger sensores, actuadores y el procesador.

El ambiente es el laboratorio de automatización y control de la ESPE, las variaciones de temperatura, campos magnéticos provenientes de otros módulos y elementos del laboratorio, la utilización de artefactos electromagnéticos y las tarjetas de adecuación de señal, son efectos medioambientales que podrían afectar el correcto funcionamiento del Sistema Modular Didáctico.

### **3.4.2. Automatización**

La Automatización industrial se puede entender como la facultad de autonomía o acción de operar por sí solo que poseen los procesos industriales y donde las actividades

de producción son realizadas a través de acciones autónomas, y la participación de fuerza física humana es mínima y la de la inteligencia artificial máxima. Recordemos que ésta es producto de la inteligencia natural, pero su manifestación en los sistemas de control es mediante la programación en los distintos tipos de procesadores, por lo que es artificial.

Los grados de participación se pueden ilustrar como en la figura siguiente, en la que se muestra que a mayor nivel de automatismo, hay un mayor nivel de inteligencia y menor nivel de intervención físico humana.

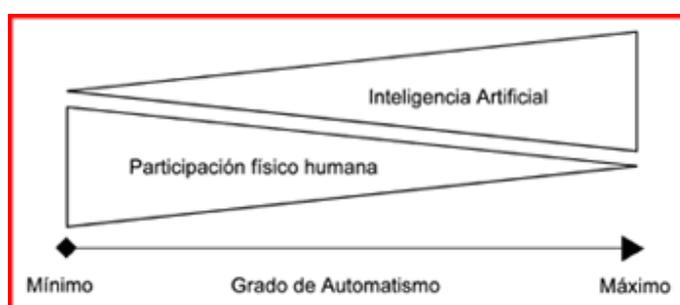


Figura 79. Inteligencia artificial vs. Participación físico humana

(EMB.cl, 2013)

### 3.4.2.1. Obtención de Modelos Matemáticos

El módulo didáctico maneja cuatro variables, las cuales se controlan para obtener un sistema automatizado. Para manejar las variables, estas se procesan y analizan matemáticamente.

Para identificar el modelo matemático que gobierna los sistemas del módulo, se adquieren los datos de entrada y salida de cada sistema, durante un intervalo de tiempo y con un tiempo de muestreo preestablecidos.

La transmisión de datos entre la tarjeta arduino y el computador se realiza mediante comunicación serial; el cable USB (Bus serial universal), es la interfaz física de comunicación. Mediante la utilización del entorno de comunicación serial propia de

arduino se obtienen los datos que luego se tabulan e ingresan como vectores en el entorno de Matlab para ser procesados.

- **ADQUISICIÓN MODELO PRESIÓN:**

El sensor de presión entrega una señal de voltaje analógica que varía entre 0.5 y 4.5 Vdc, para un rango de presión de 0 a 4 bar. La placa arduino posee entradas analógicas; dichas entradas funcionan como un convertidor analógico digital (ADC por sus siglas en inglés), obteniéndose datos entre 0 y 1023 bits, para una entrada que varía entre 0 y 5 Vdc.

Se conecta el cable de señal del sensor de caudal directamente en la placa arduino, en el pin A0, obteniendo mediante programación su respectivo valor digital.

Se varía la potencia de la bomba, mediante la utilización del control de ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés) incorporado de la tarjeta Arduino, se conecta el pin 11 de la placa arduino a la entrada pwm de la placa de la bomba principal.

El proceso de obtención del modelo matemático que gobierna al proceso de incremento de presión se describe a continuación:

1. Mediante un programa cargado en la placa arduino se obtienen los datos a los que varía el PWM de la bomba principal y el correspondiente valor del sensor de presión, generando una tabla de valores que describe el funcionamiento de la planta.

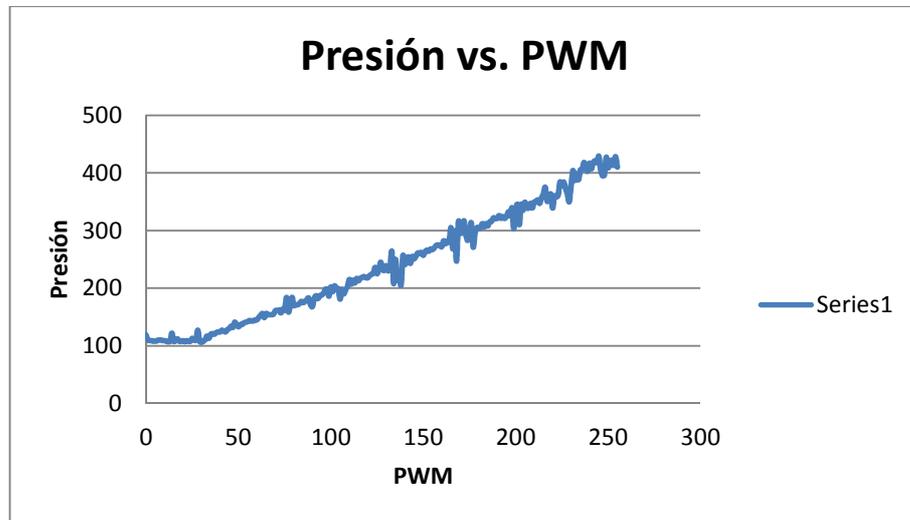


Figura 80. Presión vs. PWM

- En Matlab se crean dos vectores con los valores obtenidos, los cuales serán ingresados en ident, la herramienta de identificación de sistemas de matlab, en este caso los vectores envío y recepción son las variables input y output respectivamente, determinamos el tiempo de inicio como 0 y el tiempo de muestreo de 0.1 segundos el cual fue establecido en el programa de adquisición.

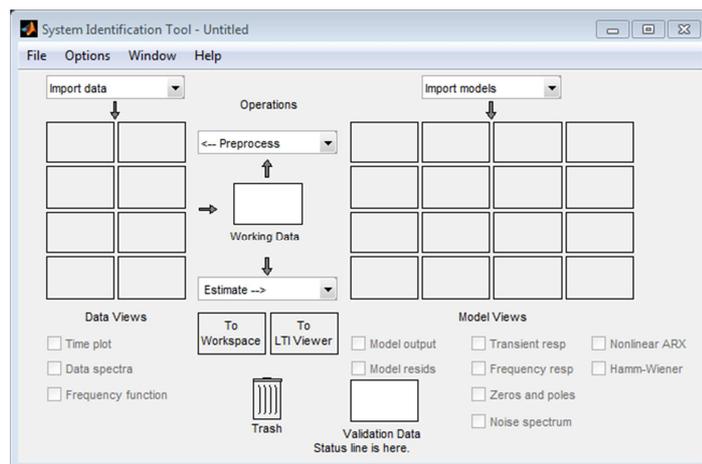


Figura 81. Ident, herramienta de identificación de sistemas

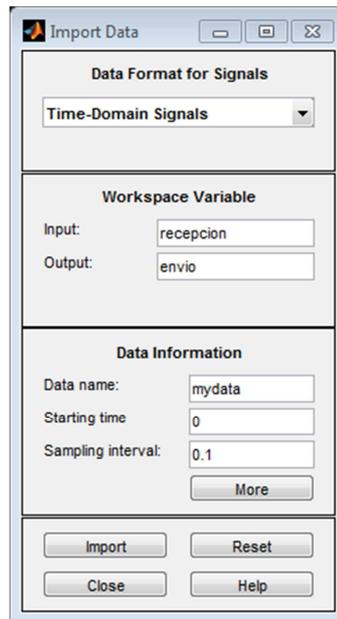


Figura 82. Import data, ident

3. Con los datos ingresados, se puede empezar a discriminar el modelo de la planta, la herramienta ident nos permite agregar o quitar ceros, polos retrasos e integradores, mediante prueba y error se determina cual es el modelo que más se aproxima a nuestra planta.

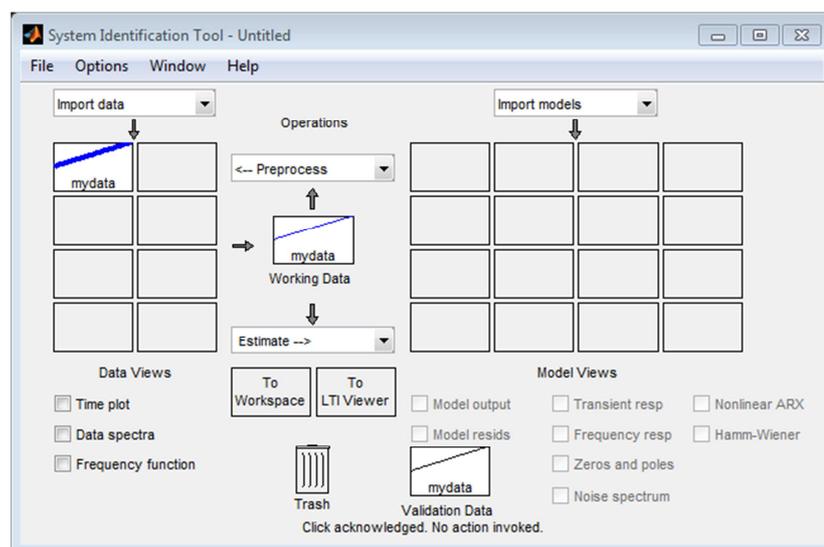


Figura 83. Etorno de Ident

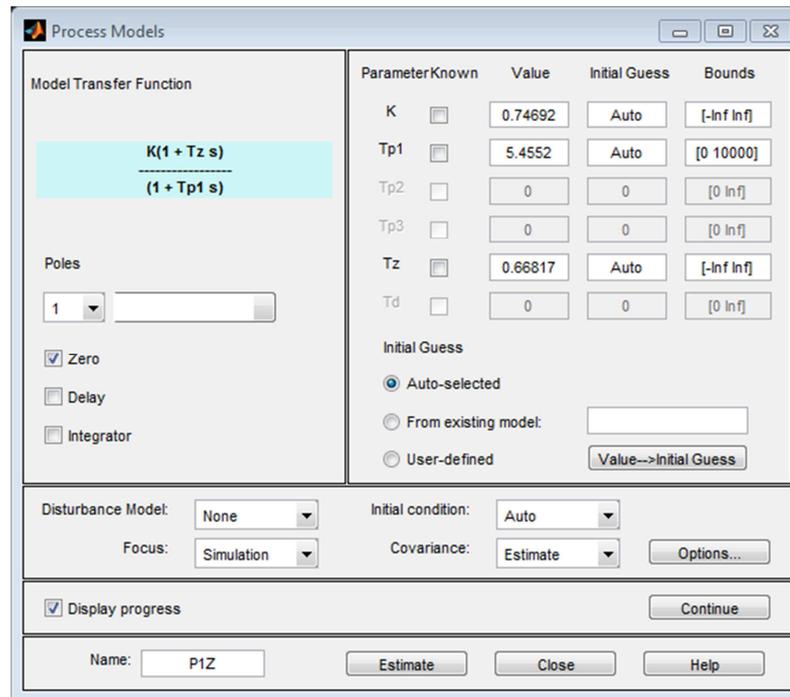


Figura 84. Process models, ident

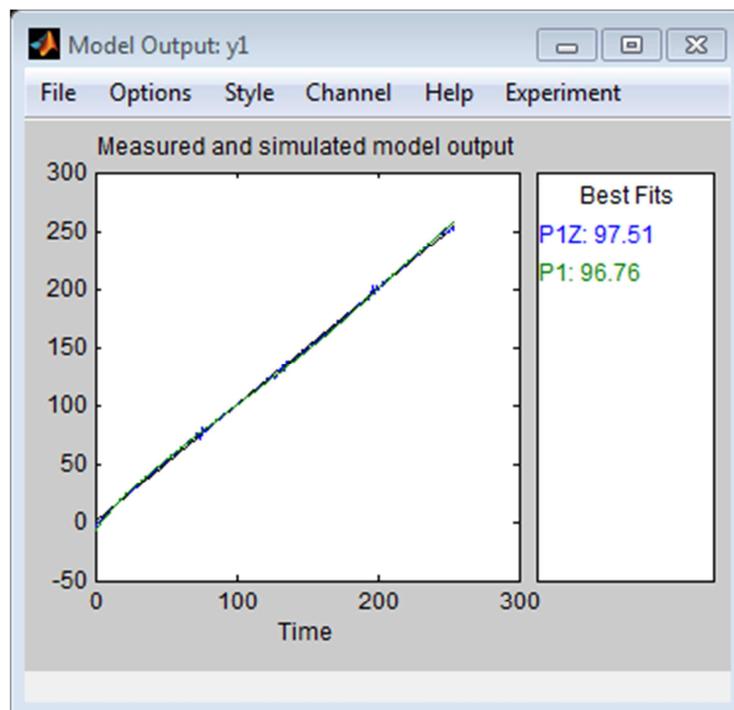


Figura 85. Aproximación del Modelo de presión

De los resultados obtenidos se concluye que el modelo matemático del sistema presión es:

$$G(s) = 1.6639 * \frac{1 + 77.29s}{1 + 80.932s}$$

- **ADQUISICIÓN NIVEL:**

El sensor de nivel es un sensor ultrasónico y nos entrega una señal de voltaje a diferente frecuencia la cual varía linealmente respecto de la distancia medida, para obtener el valor de la distancia medimos el ancho de pulso de la señal de retorno del sensor, este tiempo multiplicado por la velocidad del sonido nos devuelve la distancia medida. El sensor ultrasónico además de la alimentación, necesita ser conexionado a dos terminales de la tarjeta arduino con control PWM, el uno enviará una señal cuadrada y el otro recibirá la señal de retorno al rebotar el ultrasonido en un objeto estos terminales son trigger pin 9 y echo pin 8.

En este caso se analizan los niveles mínimo y máximo del tanque de control y su correspondiente lectura en el sensor, después del análisis se obtuvo como mínimo valor 4 cm y como máximo valor 40 cm.

- **ADQUISICIÓN MODELO CAUDAL:**

El sensor de caudal entrega una señal de frecuencia que varía proporcionalmente respecto del caudal. La placa arduino posee entradas que pueden leer trenes de pulsos; se lee el ancho de pulso que corresponde al periodo de la señal leída, y con esto se obtiene el valor de la frecuencia. Se conecta la entrada del sensor de caudal directamente en la placa arduino, en el pin 10.

Se varía la potencia de la bomba, mediante la utilización del control de ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés) incorporado de la tarjeta arduino, conectamos al pin 11 la entrada pwm del controlador de la bomba.

Se obtienen los datos mediante la utilización de la ventana de comunicación serial de arduino, los datos se almacenan en vectores en Matlab. Los vectores envío y recepción, se envían con un tiempo de muestreo de 0.5 segundos. Para obtener los datos, el valor de

envío incrementa proporcionalmente desde 0 hasta 255, y este valor se envía a la tarjeta arduino y hace actuar a la bomba mediante control PWM utilizando este valor; luego la tarjeta arduino retorna un valor de la medición del sensor, el cual se almacena en el vector recepción. Obtenemos dos vectores que corresponden a los datos de nuestro modelo matemático.

En el entorno de Matlab, utilizamos la herramienta ident para obtener el modelo matemático que gobierna el comportamiento del sistema caudal.

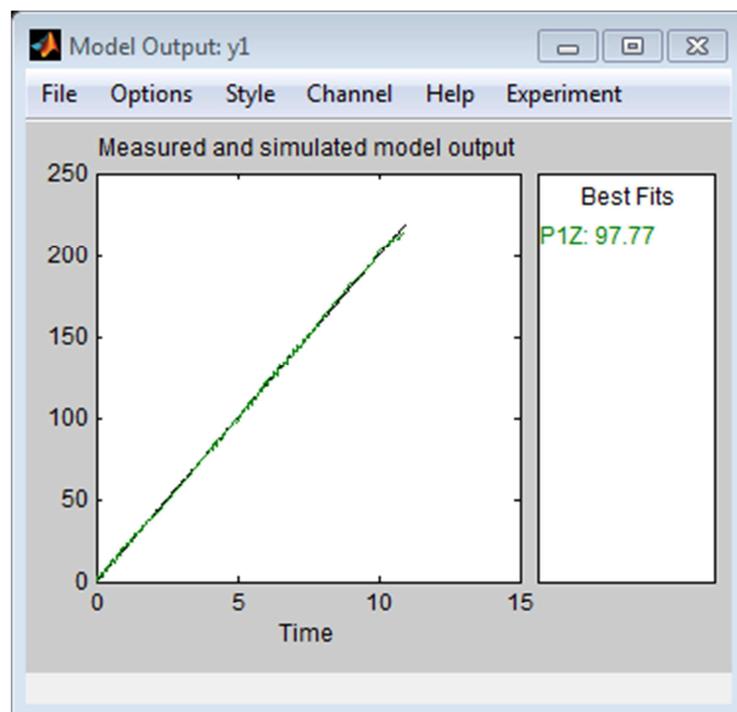


Figura 86. Aproximación del Modelo de caudal

De los resultados obtenidos se concluye que el modelo matemático del sistema presión es:

$$G(s) = 2.4384 * \frac{1 + 2.3119s}{1 + 4.3971s}$$

- ADQUISICIÓN TEMPERATURA:

El sensor de temperatura es una PT100; se realizó una placa de adaptación de la señal resistiva del sensor para obtener una señal que varía de 0 a 5 V para una temperatura de

15° a 30° centígrados. La señal se conecta directamente a la tarjeta arduino en el pin A1 y mediante conversión ADC se obtiene una señal digital que varía de 0 a 255.

#### 3.4.2.2. Programación y simulación de controladores

Con los modelos matemáticos obtenidos se pueden obtener los respectivos controladores, proceso que se realiza con la ayuda de la herramienta pidtool de Matlab. La programación de los controladores se realiza mediante lazos de programación como se indica a continuación.

- CONTROL ON-OFF NIVEL

Con los datos obtenidos de nivel se realiza el control on-off del mismo, el sensor ultrasónico permite tener una señal constante del nivel. El setpoint se ingresa como un número porcentual entre 0 y 100 que corresponde a 4 y 40cm respectivamente. Obtenido el setpoint, y el nivel real se encenderá la bomba de llenado o la bomba de vaciado respectivamente hasta llegar al nivel indicado.

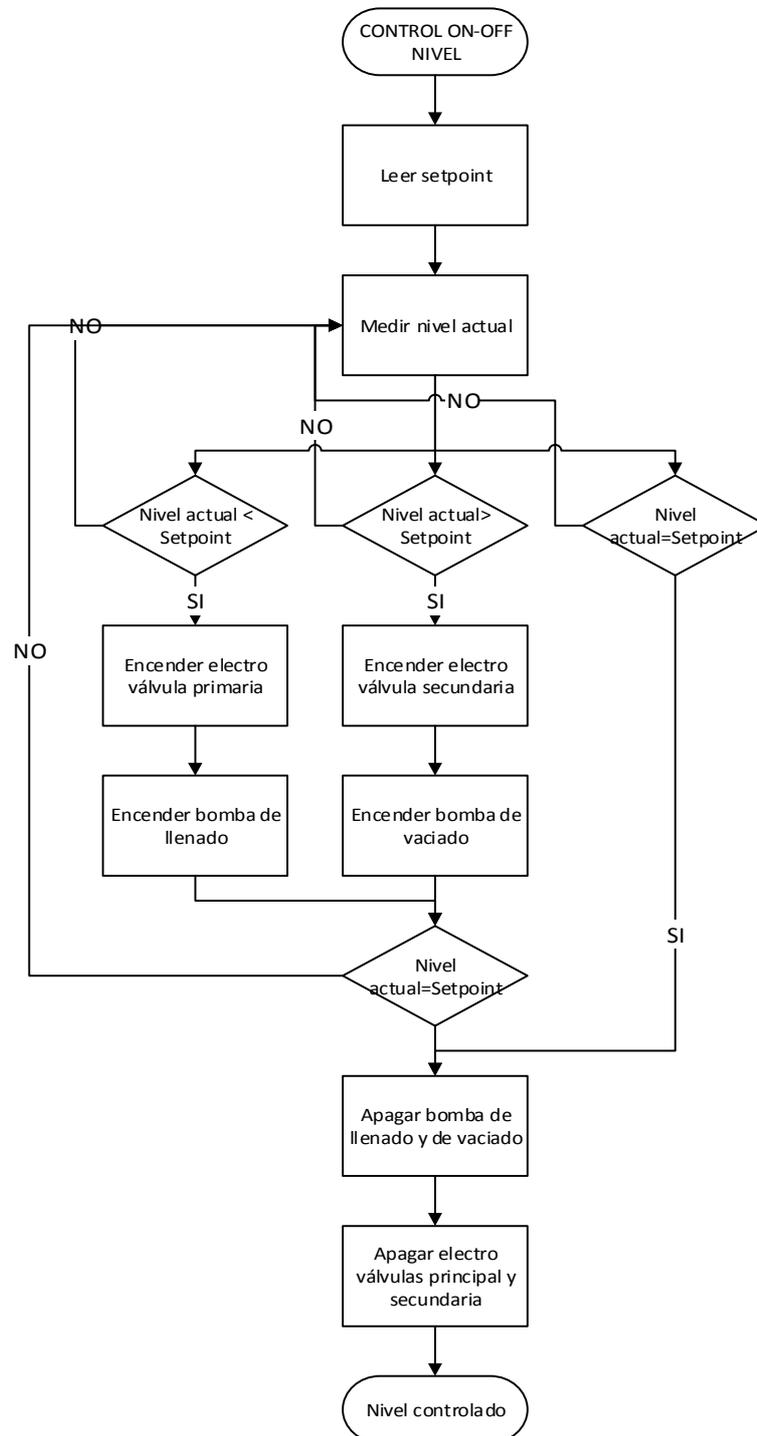


Figura 87. Diagrama de flujo, Control on-off de nivel

- CONTROL PI DE PRESIÓN

Después de utilizar la herramienta pidtool, se obtiene que el mejor controlador para este modelo es un controlador proporcional integral, para el cual las constantes son  $k_i=0.09354$  y  $k_p= 0.4535$  con un tiempo de estabilización de 30 segundos.

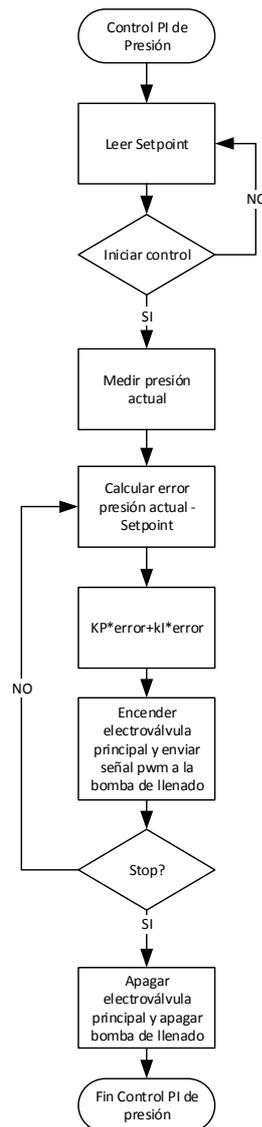


Figura 88. Diagrama de flujo, Control PI de Presión

- CONTROL I DE CAUDAL

Para controlar el caudal se escogió un controlador integral; con la ayuda de la herramienta pidtool de matlab se obtiene la constante  $k_i = 0.75595$ , con un tiempo de estabilización de 3 segundos.

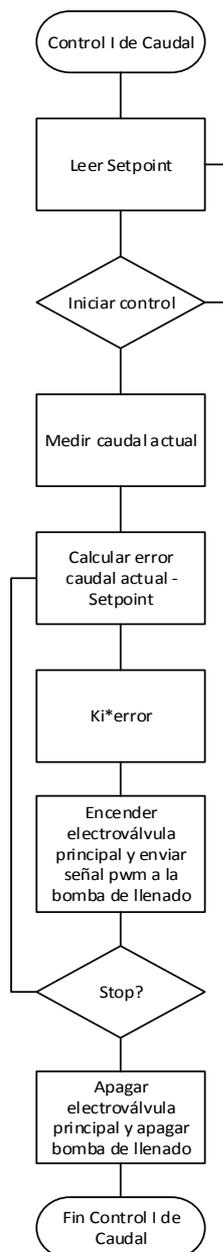


Figura 89. Diagrama de flujo, Control I de caudal

- REGULACIÓN DE TEMPERATURA

Para realizar el control de temperatura se decide utilizar un control on off, ya que los cambios se producen de manera muy lenta, por lo que lo que realiza esta función es medir la temperatura actual y llevarla hasta una temperatura previamente establecida a través de la utilización de una niquelina, luego de terminar este proceso la niquelina se apaga y una alarma indica el final del proceso.

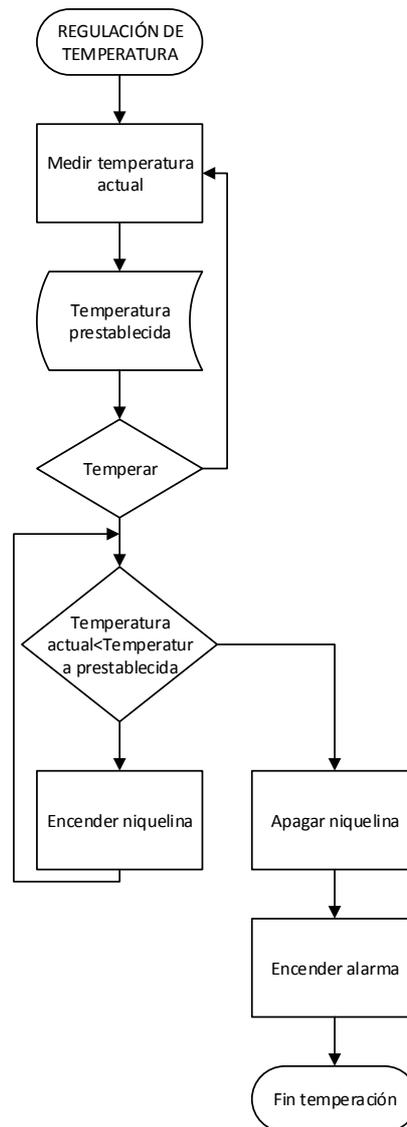


Figura 90. Diagrama de flujo, Regulación de temperatura

### 3.4.2.3. Instrumentación

Para la realización del sistema modular didáctico para el control de nivel, caudal, presión y temperatura se escogen los instrumentos adecuados para los rangos que maneja nuestro sistema.

A continuación se detallan los sensores utilizados para la medición de las variables del sistema.

Tabla 46.

Detalle de los Sensores Utilizados

<b>Variable</b>	<b>Rango de entrada</b>	<b>Rango de salida</b>	<b>Modelo</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>
<b>Temperatura</b>	-190-840 °C	22.78-390 Ω	Pt100	RTD (Dispositivo Termo Resistivo)
<b>Caudal</b>	0.4-4 GPM	28-340 Hz	FT-330	Sensor tipo turbina
<b>Presión</b>	0-4 bar	0,5-4,5 Vdc	PCA2-B4VG	Sensor tipo membrana
<b>Nivel</b>	0.02-4 m.	0-40KHz	HC-SR400	Sensor ultrasónico

### 3.4.3. Diseño del sistema de comunicación con las estaciones del proceso

Para la obtención de los modelos matemáticos y el posterior control de la tarjeta arduino se utiliza la comunicación serial.

La tarjeta arduino mega 2560 posee cuatro canales de comunicación serial, el primer canal se lo utiliza para la comunicación entre las tarjetas y el computador y el segundo canal para la comunicación entre los dos arduinos, los canales restantes quedan libres y pueden ser utilizados para enlazarse a otros sistemas.

### 3.4.3.1. Comunicación mediante la tarjeta arduino y el computador

Para comunicar la tarjeta arduino al computador el primer paso es instalar el controlador de la tarjeta arduino y el software de programación los cuales se pueden descargar de la red, en la página [arduino.cc](http://arduino.cc).

La comunicación entre el arduino y el computador utiliza como medio físico un cable USB, el arduino tiene asignado el terminal USB para realizar comunicación por el canal Serial.

### 3.4.3.2. Comunicación arduino-arduino

La interfaz física para la comunicación entre los dos arduinos utiliza un cable de dos hilos para la comunicación, además la alimentación de las dos tarjetas debe ser la misma, el conexionado va de la siguiente manera:

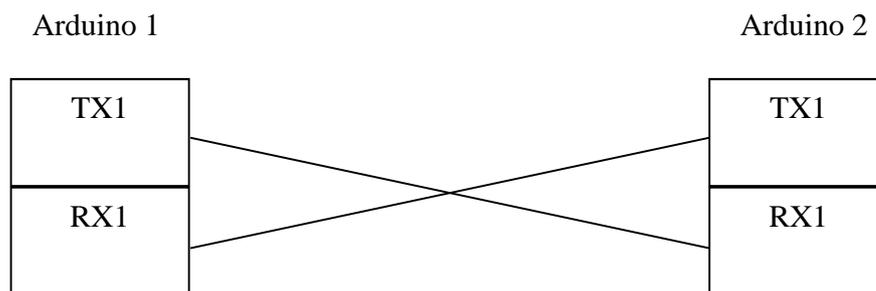


Figura 91. Esquema de conexión para envío y recepción entre arduinos

El canal de comunicación entre los dos arduinos es el Serial1, por lo que se utilizan los pines de comunicación Tx1 y Rx1 de las dos tarjetas.

### 3.4.3.2. Pantalla de control

#### 3.4.3.2.1. Librerías a utilizar

La pantalla TFT de Arduino necesita librerías que ayuden a su programación, las librerías que se necesitan son:

- tinyFAT.h: Esta biblioteca es la que nos permite realizar comunicación y los sistemas de archivos de SPI. La biblioteca es compatible con FAT16 formateado

tarjetas SD de hasta 2 GB de tamaño. Los nombres de archivo largos no son compatibles.

- UTFT.h: Esta biblioteca es la que permite trabajar con las pantallas TFT.
- UTFT\_tinyFAT.h: Esta biblioteca es un complemento para UTFT y no va a funcionar por sí solo. Esta biblioteca también requiere la biblioteca tinyFAT. Esta biblioteca añade una manera simple de cargar imágenes desde tarjetas SD. Las imágenes deben estar en formato .ras.
- UTouch.h: Como se dijo anteriormente, esta biblioteca es principalmente un complemento para UTFT, pero la biblioteca es la que permite funcionar como touch.



Figura 92. Pantalla utilizada

(Catálogo de Arduino, 2013)



Figura 93. Panel de control

## 3.4.3.2.2. Diagrama de Flujo pantalla de control

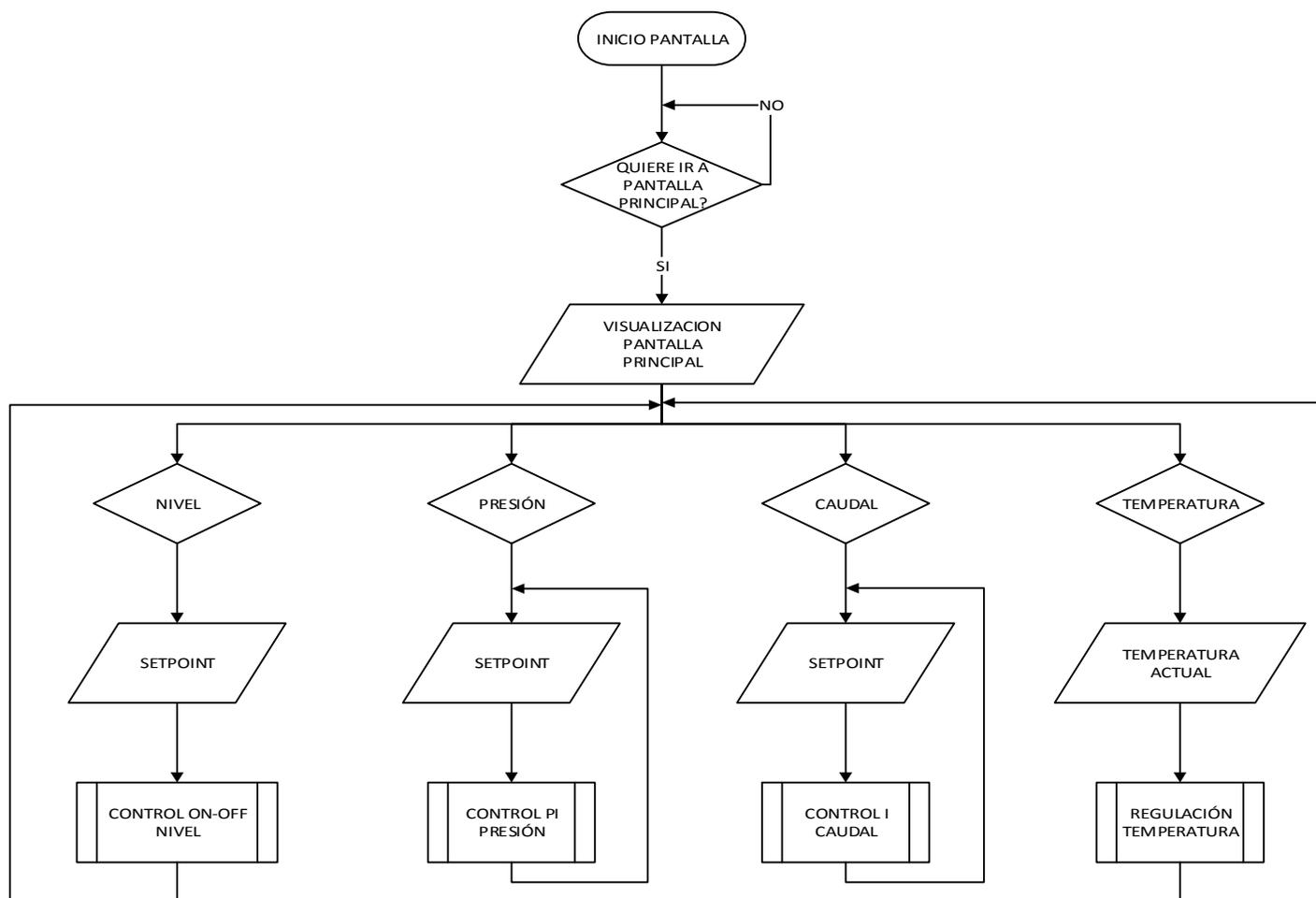


Figura 94. Diagrama de flujo, pantalla de control

### 3.4.3.2.3. Explicación del programa

El programa está diseñado para realizar los diferentes controles dependiendo de la decisión del operario, así tenemos:

Pantalla de inicio, en esta pantalla se muestra el nombre de la tesis las personas que la elaboraron y la opción de ingresar a la pantalla principal.

Pantalla principal, en esta pantalla se puede elegir el control que se quiera utilizar.



Figura 95. Pantalla principal

Una vez ya elegido se desplegará la ventana del control que se eligió, en la cual debemos seleccionar el setpoint al que se trabajará.



Figura 96. Pantalla de las variables



Figura 97. Pantalla activado Presión

Ya con el setpoint se debe poner start y comenzará el proceso de control que se haya seleccionado, si se desea cambiar el valor del set point dentro del mismo control, se debe cambiar el setpoint y volver a presionar start. Si desea parar el sistema se debe poner stop, y el todos los elementos pararán.



Figura 98. Boton para inicio de control

Si se desea cambiar de control se debe presionar stop y seleccionar el nuevo control que se desea realizar, y volver a hacer el proceso.



Figura 99. Boton para parar los controles

Para la variable temperatura tenemos la siguiente pantalla:



Figura 100. Pantalla de temperatura

En esta pantalla al presionar start se visualiza los datos de temperatura medidos por el sensor, y cuando se presiona temperar suena una alarma durante 1 segundo y se enciende la niquelina hasta que la temperatura del tanque alcance los grados indicados en este caso 24°C.

Una vez que se haya concluido se cerrara la pantalla, sonará la alarma 3 veces y se apagará la niquelina.

#### **3.4.4. Diseño del Paro de Emergencia**

Los botones de parada de emergencia (E-Stop) son un componente importante de seguridad de muchos circuitos eléctricos, especialmente que controlan equipos peligrosos, como bombas, maquinaria en movimiento, sierras, molinos, y herramientas de corte, cintas transportadoras, y muchos otros tipos de equipo. Están diseñados para permitir que un operador o espectador pueda parar el equipo en un apuro si algo va mal.

Los botones de parada de emergencia están conectados en serie con el circuito de control en una pieza de un equipo. Al pulsar el botón de parada de emergencia se interrumpe el circuito y elimina el poder desde la fuente que mantiene el circuito energizado.

El paro de emergencia en nuestro módulo estará presente en la línea de alimentación, antes de los interruptores de alimentación.

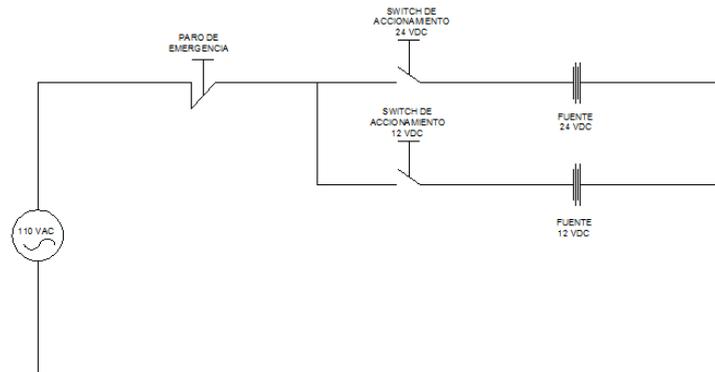


Figura 101. Diseño de Paro de emergencia

### 3.5. Enlace de los Sistemas

Los subsistemas del sistema modular son:

- ✓ Sistema mecánico
- ✓ Sistema de control
- ✓ Sistema eléctrico o de potencia
- ✓ Sistema electrónico

El sistema mecánico tiene dos partes, la primera la infraestructura es decir la mesa de soporte de los tanques y demás elementos, y el segundo el sistema de tuberías, este sistema ha sido diseñado basándose en las dimensiones de los sensores y actuadores a utilizarse.

El sistema mecánico ha sido probado mediante software mientras que el sistema de tuberías se lo ha colocado de ½ pulgada puesto que los elementos principales como son la bomba y las electroválvulas tienen una salida de ½ pulgada.

El sistema eléctrico está compuesto por sensores, actuadores, placas de acondicionamiento y de control, los mismos que están siendo energizados mediante

fuentes fijas de alimentación de los diferentes voltajes, estas fuentes son el enlace entre el sistema electrónico y el sistema de potencia.

Al sistema de potencia para darle seguridad se le agrego un botón de paro de emergencia e interruptores de activación para las fuentes.

El sistema de control, tiene dos fases la primera de selección del control que se la realizará en la pantalla táctil; y el control mismo que se basara en los sensores y actuadores conectados al arduino principal.

## **CAPITULO 4**

### **4.1. Pruebas de funcionamiento**

#### **4.1.1. Calibración de sensores**

Para el correcto funcionamiento del sistema modular didáctico los sensores deben ser calibrados, se realizó el procedimiento en base a otros sistemas de medición ya establecidos, la modalidad que se utilizó para calibrar los sensores se describe a continuación.

##### **Sensor de Nivel**

Para calibrar el sensor de nivel, se compara los valores obtenidos mediante el sensor de ultrasonidos con valores medidos con un flexómetro sobrepuesto en el tanque, la tolerancia del flexómetro utilizado es de 0,2 mm por cada metro.

De estas mediciones obtenemos la siguiente tabla ejemplo:

Tabla 47.

Datos de Calibración sensor de Nivel

<b>Tiempo(min)</b>	<b>Medido Con Flexómetro (cm)</b>	<b>Medido Con sensor de nivel (cm)</b>
<b>0,3</b>	50,4	51
<b>1</b>	47	48,1
<b>1,3</b>	44	45,3
<b>2</b>	40,7	41,5
<b>2,3</b>	37,4	38
<b>3</b>	34,1	34,9
<b>3,3</b>	30,9	31,7
<b>4</b>	27,4	29,1

Como se puede notar la diferencia promedio es de 0,9 lo que quiere decir que el rango de error del sensor es de  $\pm 1$ cm aproximadamente.

### **Sensor de Caudal**

Para calibrar el sensor de caudal se comparó los valores obtenidos con el sensor tipo turbina con los obtenidos con un rotámetro, de esta manera se comprobó que los valores obtenidos correspondan a mediciones reales.

Tabla 48.

Datos de Calibración sensor de Caudal

<b>PWM(Bomba)</b>	<b>Medido Con Rotámetro (GPM)</b>	<b>Medido Con sensor de caudal (GPM)</b>
<b>50</b>	0.1	0.1
<b>75</b>	0.4	0.5
<b>100</b>	0.7	0.6
<b>125</b>	1.1	0.9
<b>150</b>	1.5	1.3
<b>175</b>	2.1	2
<b>200</b>	2.5	2.4
<b>255</b>	3	3

Como se puede notar la diferencia promedio es de 0,1 lo que quiere decir que el rango de error del sensor es de  $\pm 0.1$  GPM aproximadamente.

### **Sensor de Presión.**

La presión obtenida con el sensor de diafragma corresponde a la presión ejercida en las paredes de la tubería a causa de la variación del caudal dentro de la tubería por lo que para calibrar este sensor se utilizó igual que para el sensor de caudal un rotámetro.

Tabla 49.

Datos de Calibración sensor de Presión

<b>PWM(Bomba)</b>	<b>Medido Con Rotámetro (PSI)</b>	<b>Medido Con sensor de caudal (bar)</b>
<b>50</b>	5	7
<b>75</b>	10	12
<b>100</b>	15	14
<b>125</b>	21	20
<b>150</b>	27	27
<b>175</b>	30	29
<b>200</b>	43	41
<b>255</b>	55	53

Como se puede notar la diferencia promedio es de 1,4 lo que quiere decir que el rango de error del sensor es de  $\pm 1,4$ bar aproximadamente.

### **Sensor de temperatura**

Para calibrar la PT100 se utilizó como calibre la medición obtenida con el sensor de temperatura de un multímetro digital.

Tabla 50.

Datos de Calibración sensor de Temperatura

<b>Tiempo(min)</b>	<b>Medido Con Termómetro (°C)</b>	<b>Medido Con sensor de Temperatura (°C)</b>
<b>1</b>	17	17
<b>1,5</b>	17	17
<b>2</b>	18	17
<b>2,5</b>	18	18
<b>3</b>	19	19
<b>3,5</b>	19	19
<b>4</b>	20	20
<b>5</b>	22	21

Como se puede notar la diferencia promedio es de 1 lo que quiere decir que el rango de error del sensor es de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  aproximadamente.

#### **4.1.2. Verificación y correcciones Sistema Mecánico**

El sistema mecánico propuesto es el ideal, puesto que no tiene ninguna deformación pronunciada en las piezas.

El bastidor con los tanques llenos no tiene deformación alguna, lo que comprueba que el diseño es correcto.

El tanque B o secundario tiene una deflexión mínima al estar sometido a su capacidad máxima; esta deformación está dentro del rango de tolerancia que se presentó en el dimensionamiento de los tanques, mientras que el tanque A o principal no presenta deflexión alguna.

Para el sistema de tuberías se eligió trabajar con tuberías de ½ pulgada ya que son las más comunes en el mercado, esta elección es correcta ya que los sensores también son estándar a ½ pulgada y solo para el sensor de presión se utiliza un reductor a 3/8 de pulgada.

#### 4.1.3. Verificación y correcciones Sistema Electrico/Electrónico

El sistema eléctrico se diseñó con una sola fuente de computadora la cual alimentaba a toda la instrumentación. Este sistema no tuvo buena respuesta ya que la corriente no era la necesaria para el correcto funcionamiento de los equipos.

Para esto se incluyeron dos fuentes de voltajes fijos 12VDC y 24VDC con las respectivas seguridades, con estas fuentes se alimentaron las electroválvulas (principal y secundaria) y las bombas (principal y secundaria), estas fuentes tienen seguridades ya que presentan su propio transformador, tienen filtrado de ruidos, además que tienen

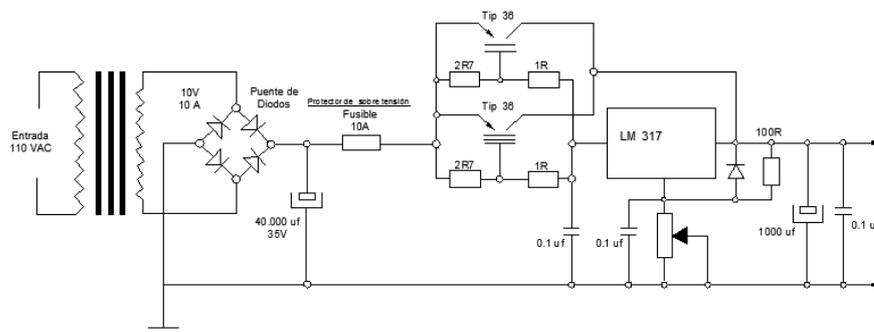


Figura 102. Esquema fuente de 12VDC

La protección de sobre corriente principal es el fusible a la entrada del divisor de corriente mediante transistores. Este último está implementado debido a las limitaciones que presenta el regulador de voltaje (LM317) en cuanto a corriente de alimentación se

refiere. Con la configuración de transistores NPN en paralelo conectados directamente a la salida del regulador, podemos alimentar la corriente requerida por la carga.

La protección para sobre tensiones consiste en diodos en paralelo tanto a la entrada como a la salida de los reguladores de voltaje evitando así que una polaridad inversa destruya a los elementos del sistema.

#### **4.1.4. Verificación y correcciones del sistema de control**

En el sistema de control se diseñaron los controladores los cuales para los cuatro procesos de regulación se probaron y rediseñaron hasta obtener la mejor respuesta, variando las constantes de los controladores, los tipos de controladores y el tiempo de muestreo.

En el caso del control de nivel se analizó la opción de utilizar un control PID, pero los cambios en el nivel se producen de manera muy lenta por lo que se decide utilizar un control on-off, el margen de error para el control es de  $\pm 2\text{mm}$ .

Al momento de realizar la toma de datos del sensor de presión tipo diafragma se detectó que los valores del sensor eran erráticos y por tanto dificultaba la obtención del modelo matemático, para solucionar este problema se decide realizar un promedio de 20 valores medidos por cada variación en la presión de la bomba, de esta manera se obtuvieron valores más manejables y se obtuvo el modelo matemático.

## **4.2. Análisis financiero**

### **4.2.1. Antecedentes**

Debido a que la tecnología es muy importante para la industria de nuestro país actualmente, es necesario que en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Mecatrónica el estudiante se pueda familiarizar con proyectos industriales, por dicha razón se genera el proyecto de realizar un módulo didáctico orientado a los temas a tratarse en la

asignatura de Automatización Mecatrónica la cual es de suma importancia en la formación de dicha carrera.

El proyecto es financiado totalmente por los estudiantes ejecutores de dicho proyecto de grado.

#### COSTOS DEL PROTOTIPO

##### Costos directos

Dentro de los costos directos del prototipo tenemos:

**Costos de construcción**, para la bancada se necesitó de la experiencia de un tecnólogo en el trabajo con aluminio, partiendo de un diseño y planos previamente elaborados.

Tabla 51.

Costos directos 1-Bancadas 2

Detalle	Costo	Cantidad	Total
<b>Bancada</b>	210	1	210

Para la elaboración de los tanques de almacenamiento de agua se necesitó la ayuda de un técnico que trabaje con acrílico, para esto se realizaron previamente los estudios para la selección del material y las dimensiones de los tanques.

Tabla 52.

Costos directos- Tanques

Detalle	Costo	Cantidad	Total
<b>Tanque A</b>	42	1	42
<b>30*30*60cm</b>			
<b>Tanque B</b>	60	1	60
<b>50*50*30cm</b>			
<b>Total</b>			102

El costo de la ingeniería de los tesisistas del proyecto durante los meses que duró el mismo es el siguiente:

Tabla 53.

Costos Directos-Ingeniería

<b>Tesisistas</b>	<b>\$ 3200,00</b>
-------------------	-------------------

**Costos de los materiales**, para alcanzar los objetivos propuestos y realizar el módulo propuesto se necesitan los siguientes materiales:

Tabla 54.

Lista de Materiales-Sistema Mecánico

<b>Material</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
<b>Tubo PVC</b>	11,29	1	11,29
<b>Teflón</b>	0,35	2	0,7
<b>Unión PVC</b>	0,44	2	0,88
<b>Impermeabilizante Permatex</b>	2,6	1	2,6
<b>Silicona</b>	2,61	1	2,61
<b>Codo PVC</b>	0,43	6	2,58
<b>Neplo PVC</b>	0,32	5	1,6
<b>Universal PVC</b>	0,96	3	2,88
<b>Pegamento UHU</b>	0,69	1	0,69

**CONTINUA** 

<b>Neplo PVC 6cm</b>	0,29	5	1,45
<b>T PVC</b>	0,71	1	0,71
<b>Tuerca S. Temperatura</b>	1,16	1	1,16
<b>Neplo PVC 10cm</b>	0,57	1	0,57
<b>Neplos S. Caudal</b>	2,4	2	4,8
<b>Empaque S. Temperatura</b>	0,65	1	0,65
<b>Soporte S. Presión</b>	0,4	1	0,4
<b>Neplo Acero 10cm</b>	2,08	2	4,16
<b>Unión Roscable 3/8"</b>	3,39	2	6,78
<b>Válvula Check</b>	3,58	1	3,58
<b>Total</b>			50,09

Tabla 55.

## Lista de Materiales - Sistema Eléctrico

<b>Material</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
<b>Sensor Temperatura</b>	<b>67,67</b>	<b>1</b>	<b>67,67</b>
<b>Válvulas Selenoides</b>	<b>87,87</b>	<b>2</b>	<b>175,74</b>
<b>Porta fusible</b>	0,71	2	1,42
<b>Paro emergencia</b>	7	1	7

CONTINUA



<b>Espadín macho</b>	<b>0,45</b>	<b>1</b>	<b>0,45</b>
<b>Espadín hembra</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>
<b>Estaño</b>	<b>1,5</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>
<b>Cable Flexible</b>	<b>0,45</b>	<b>4</b>	<b>1,8</b>
<b>Terminales</b>	<b>0,15</b>	<b>12</b>	<b>1,8</b>
<b>Resistencia</b>	<b>0,04</b>	<b>3</b>	<b>0,12</b>
<b>Bornera</b>	<b>0,35</b>	<b>1</b>	<b>0,35</b>
<b>Punta de Cautín</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
<b>Fuente de Computadora</b>	<b>18</b>	<b>1</b>	<b>18</b>
<b>Interruptor Doble</b>	<b>1,65</b>	<b>1</b>	<b>1,65</b>
<b>Cable Gemelo</b>	<b>0,75</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
<b>Enchufe</b>	<b>0,99</b>	<b>2</b>	<b>1,98</b>
<b>Interruptor Sencillo</b>	<b>1,04</b>	<b>1</b>	<b>1,04</b>
<b>Organizador para Cable</b>	<b>3,96</b>	<b>1</b>	<b>3,96</b>
<b>Arduino Mega</b>	<b>62</b>	<b>2</b>	<b>124</b>
<b>Bomba</b>	<b>184</b>	<b>2</b>	<b>368</b>
<b>Sensor Caudal</b>	<b>256</b>	<b>1</b>	<b>256</b>
<b>Fuente 24v</b>	<b>65</b>	<b>1</b>	<b>65</b>
<b>Fuente 12v</b>	<b>60</b>	<b>1</b>	<b>60</b>

CONTINUA



<b>Módulo de Relé</b>	<b>25</b>	<b>2</b>	<b>50</b>
<b>Controlador PWM</b>	119	1	119
<b>Pantalla</b>	<b>150</b>	<b>1</b>	<b>150</b>
<b>Controlador de Pantalla</b>	40	1	40
<b>Sensor de nivel</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>16</b>
<b>Sensor de presión</b>	35	1	35
<b>Niquelina</b>	<b>40</b>	<b>1</b>	<b>40</b>
<b>Total</b>			1613,98

El total de los costos directos es el siguiente:

$$\text{Costos Directos: } 210 + 102 + 3200 + 50,09 + 1613,98$$

$$\text{Costos Directos: } \$ 5176,07$$

#### Costos Indirectos

Dentro de este rubro se contemplan impresiones, materiales de prueba, planificación del proyecto y planos.

Tabla 56.

Costos Indirectos

<b>Costos</b>	<b>\$ 500</b>
<b>Indirectos</b>	

#### Costo total del prototipo

El costo total del prototipo resulta de la sumatoria de todos los costos antes mencionados:

$$\text{Costo total del Prototipo} = \text{Costos directos} + \text{Costos Indirectos}$$

*Costo total del Prototipo = 5176,07 + 500*

*Costo total del Prototipo = \$ 5676,07*

## CAPITULO 5

### MANUAL DE USO Y OPERACIÓN

#### 5.1. Guías para la realización de Practicas

##### 5.1.1. Reconocimiento de los elementos que componen el módulo.

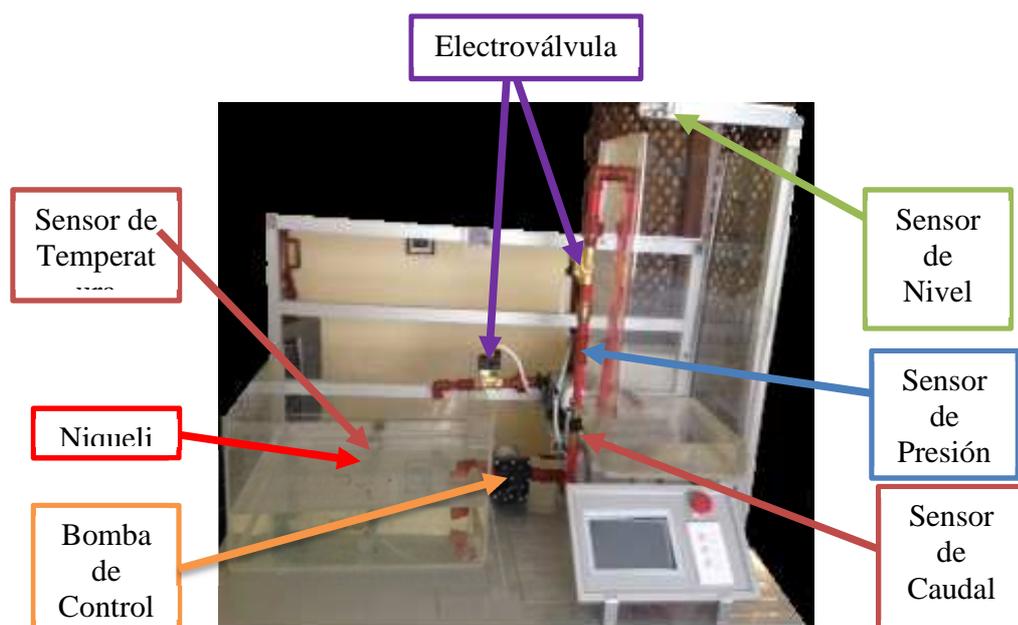
###### Guía 1

1.- Tema: Reconocimiento de los elementos que componen el módulo.

2.- Objetivo: Reconocer los elementos que componen el módulo, para conocer su funcionamiento.

3.- Marco teórico

Módulo de control de presión, nivel, caudal y temperatura: como su nombre lo indica está diseñado para el control de las variables y a su vez para su monitoreo.



### Sensores:

Un sensor o captador, como prefiera llamársele, no es más que un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que seamos capaces de cuantificar y manipular.

Normalmente estos dispositivos se encuentran realizados mediante la utilización de componentes pasivos (resistencias variables, PTC, NTC, LDR, etc... todos aquellos componentes que varían su magnitud en función de alguna variable), y la utilización de componentes activos.

A continuación se enlistarán los sensores del módulo:

Tipo	Modelo	Fotografía
<b>Presión</b>	PCA2-B4VG	
<b>Caudal</b>	FT-330	

CONTINUA 

**Nivel****HC-SR04****Temperatura****TK-102**

Actuadores:

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico”.

A continuación se detallan los actuadores del módulo:

Tipo	Modelo	Fotografía
<b>Bomba hidraulica</b>	4008-101-E65	A photograph of a SHORIN hydraulic pump. It is a compact, cylindrical device with a black body and a silver motor section. It has two blue ports on top and two red wires connected to the bottom.

CONTINUA 

---

**Solenoides**

2V025-08

**Niquelina**

N/A



---

**4.-Procedimiento:**

- a) Identifique la ubicación de los sensores y actuadores.
- b) Encienda el módulo y seleccione el control de nivel; observe el funcionamiento del sensor y reconozca el actuador.
- c) Seleccione el control de presión y observe el funcionamiento del sensor y reconozca el actuador.
- d) Seleccione el control de caudal y observe el funcionamiento del sensor y reconozca el actuador.
- e) Seleccione el control de temperatura y observe el funcionamiento del sensor y reconozca el actuador.
- f) Apague el módulo.

**5.- Cuestionario**

- 1.- Defina las características principales de los sensores de:

- Presión
- Caudal
- Nivel
- Temperatura

- 2.- Elabore un diagrama del sentido de flujo del agua.
- 3.- Investigue que tipo de bomba se está usando y sus características principales.
- 4.- Investigue el funcionamiento de una electroválvula.
- 5.- Elabore conclusiones y recomendaciones acerca del módulo.

### 5.1.2. Regulación de nivel mediante control on-off y el uso del panel de control.

#### Guía 2

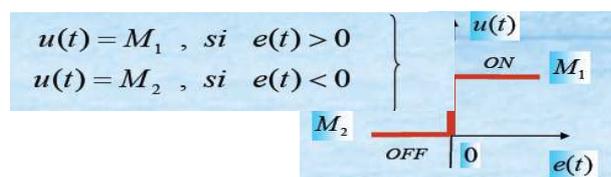
- 1.- Tema: Regulación de nivel mediante control on-off y el uso del panel de control.
- 2.- Objetivo: Elaborar un control on-off para el nivel, para familiarizarse con la programación del arduino y el panel de control.

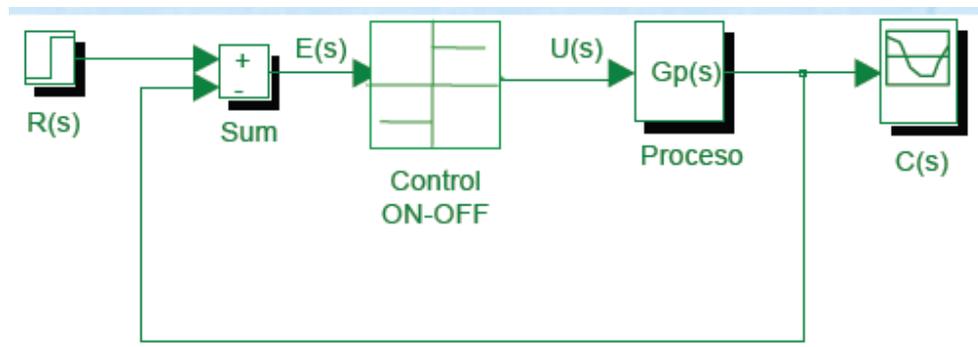
#### 3.- Marco teórico

##### Control ON/OFF

El control ON-OFF es no lineal y proporciona a su salida 2 valores fijos que corresponden a conectado/desconectado, según que la señal de error sea positiva o negativa. Inicialmente el error es positivo y el control se activa (ON) hasta llegar al valor deseado, el error se hace negativo y el controlador pasa a OFF. El proceso se repite continuamente.

Una oscilación continua rápida puede provocar un desgaste excesivo del actuador de una válvula.



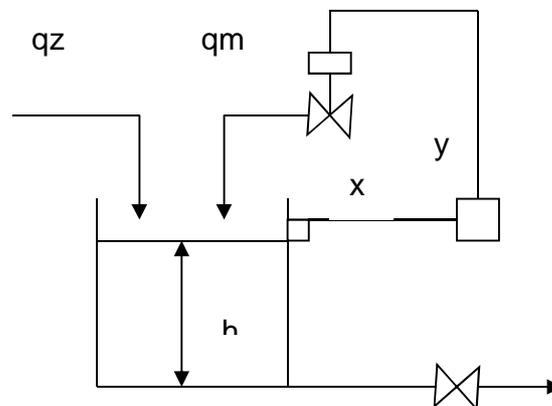


### Control de nivel en un recipiente

Se establecen los valores de  $h_{\text{máx}}$  y  $h_{\text{mín}}$  tolerables, lo que implica definir como promedio la consigna

$h = h_{\text{máx}}$  control ordena  $q_m = q_{\text{mín}}$

$h = h_{\text{mín}}$  control ordena  $q_m = q_{\text{máx}}$



4.-Procedimiento:

- Identifique la ubicación de los sensores y actuadores.
- Seleccione los niveles máximo y mínimo.
- Abra el programa de arduino y realice un programa para el control ON/OFF

5.- Cuestionario

- Cuales fueron los valores máximos y mínimos en el tanque?

- 2.- Escriba el código de programación utilizado.
- 3.- Cree usted que el control realizado es exacto? Sí, no, por qué?
- 4.- Elabore conclusiones y recomendaciones acerca control utilizado.

### 5.1.3. Encontrar la ecuación que gobierna el sistema de una planta de presión.

#### GUIA 3

- 1.- Tema: Encontrar la ecuación que gobierna el sistema de una planta de presión.
- 2.-Objetivo: Identificar la función de transferencia de la planta de presión para así poder entender el comportamiento de esta variable.
- 3.- Marco teórico

#### Función de Transferencia

En ocasiones para conocer la respuesta de un sistema en función del tiempo, se aplican en la entrada del elemento señales conocidas y se evalúan la respuesta que aparece en su salida. De este modo se obtiene la llamada respuesta transitoria. En general se introduce por la entrada del sistema una señal en forma de escalón.

Sin embargo es mucho más operativo estudiar matemáticamente la respuesta del sistema mediante la llamada función de transferencia.

Por medio de la función de transferencia se puede conocer:

La respuesta del sistema ante una señal de entrada determinada.

La estabilidad del sistema (si la respuesta del sistema se va a mantener dentro de unos límites determinados).

Qué parámetros se pueden aplicar al sistema para que éste permanezca estable.

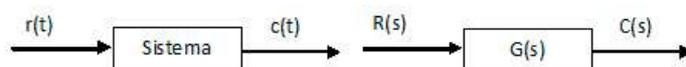


Diagrama de función de transferencia

Matemáticamente se representará:

$$G(s) = \frac{Lc(t)}{Lr(t)} = \frac{C(s)}{R(s)}$$

Características de la función de transferencia:

La función de transferencia es una propiedad del sistema y depende de las propiedades físicas de los componentes del sistema, es por tanto independiente de las entradas aplicadas.

La función de transferencia viene dada como el cociente de dos polinomios en la variable compleja  $s$  de Laplace, uno,  $N(s)$  (numerador) y otro  $D(s)$  (denominador).

El grado del denominador de la función de transferencia es el orden del sistema.

El polinomio del denominador,  $D(s)$ , se llama ecuación característica del sistema.

Distintos sistemas pueden compartir la misma función de transferencia, por lo que ésta no proporciona información acerca de la estructura interna del mismo.

Conocida la función de transferencia de un sistema se puede estudiar la salida del mismo para distintos tipos de entradas. La función de transferencia es muy útil para, una vez calculada la transformada de Laplace de la entrada, conocer de forma inmediata la transformada de Laplace de la salida. Calculando la transformada inversa se obtiene la respuesta en el tiempo del sistema ante esa entrada determinada.

El polinomio del denominador de la función de transferencia,  $D(s)$ , se llama función característica, ya que determina, por medio de los valores de sus coeficientes, las características físicas de los elementos que componen el sistema.

La función característica igualada a cero se conoce como ecuación característica del sistema:

$$a_n * S^n + a_{n-1} * S^{n-1} + a_{n-2} * S^{n-2} + \dots a_1 * S + a_0 = 0$$

Las raíces de la ecuación característica se denominan polos del sistema. Las raíces del numerador  $N(s)$  reciben el nombre de ceros del sistema.

4.- Procedimiento:

- a) Establecer los parámetros del sistema de la planta de presión.
- b) Conectar los elementos a la placa de control y a las fuentes.
- c) Realizar la programación para la toma de datos.
- d) Analizar los resultados, y proceder el en software de Sístole.

5.- Cuestionario:

- a.- Defina los elementos que comprenden la planta de presión.
- b.- Escriba la programación para poder adquirir la ecuación de transferencia de la planta de presión.
- c.- Señale que representan los ceros y los polos de la ecuación de transferencia obtenida.
- d.- Elabore la gráfica que representa la función de transferencia obtenida.

#### **5.1.4. Elaborar un controlador para una planta de presión.**

##### GUÍA 4

1.- Tema: Elaborar un controlador para una planta de presión.

2.- Objetivo: Diseñar un controlador que satisfaga a la ecuación de transferencia del sistema tomado y realice el control del mismo.

3.- Marco Teórico:

En controles industriales es muy común encontrar los siguientes 5 tipos de reguladores:

- Dos posiciones (ON-OFF).
- Proporcional (P).
- Proporcional-Integral (PI).
- Proporcional-Derivativo (PD).
- Proporcional Integral Derivativo (PID).

Control Proporcional.

La función de transferencia entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

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

Donde  $K_p$  se denomina ganancia proporcional.

Otro parámetro importante en la acción de este controlador, es la denominada banda proporcional que expresa que tan grande será la acción de control ante una señal de error en la entrada, y es igual a:

$$B_p = \frac{1}{K_p}$$

#### Control Proporcional – Integral.

El valor de salida del controlador proporcional varía en razón proporcional al tiempo en que ha permanecido el error y la magnitud del mismo, su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N * s} \right)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_N$  se denomina tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control.

#### Control Proporcional – Derivativo.

Por lo general, una gran pendiente en  $e(t)$  en un sistema lineal correspondiente a una entrada escalón considerable produce un gran sobreimpulso en la variable controlada. El control derivativo mide la pendiente instantánea de  $e(t)$ , prediciendo que tan grande será el sobreimpulso aplicando las correcciones apropiadas antes de que se presente ese sobreimpulso. La función de transferencia del control PD es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_v * s)$$

Donde  $T_v$  se denomina duración predicha.

### Control Proporcional – Integral – Derivativo.

Esta combinación tiene la ventaja de que cada una de las tres acciones de control son individuales. La función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N * s} + T_v * s \right)$$

4.- Procedimiento:

- a) Una vez con la planta ingrese los valores en el software matlab y entre a PID TOOL
- b) Seleccione las variables necesarias del sistema.
- c) Obtenga la ecuación del controlador.
- d) Pruebe y calibre si es necesario.

5.- Cuestionario:

- a.- Determine cuál sería el controlador de este sistema
- b.- Describa el procedimiento para el encontrar el controlador.
- c.- Elabora la gráfica del controlador.
- d.- Elabore conclusiones y recomendaciones.

### **5.1.5. Desarrollar un HMI para controlar la planta de presión.**

#### GUÍA 5

- 1.- Tema: Desarrollar un HMI para controlar la planta de presión
- 2.- Objetivo: Trabajar con la pantalla en el desarrollo de una HMI para el control de la planta de presión.
- 3.- Marco Teórico:

La LCD TFT táctil es una pantalla integrada con tecnología TFT (Thin Film Transistor) y una pantalla resistiva táctil, esta se conecta directamente a arduino, dando la posibilidad de implementar aplicaciones gráficas interactivas



#### Ventajas del TFT

Cada píxel en una pantalla TFT es respaldada por un pequeño transistor, que es mucho más eficiente que los monitores antiguos (de tubos de rayos catódicos). Las pantallas TFT de LCD pueden mostrar texto nítido, colores vívidos, animaciones rápidas y gráficos complejos. Esta tecnología de transistores múltiples también permite un rápido re-trazado de la pantalla de manera que la imagen no parpadee ni haga bandas.

#### 4.- Procedimiento:

- a) Familiarizarse con la Pantalla
- b) Tomar el modelo de la pantalla y agregarlo a la programación.
- c) Descargar las librerías necesarias para la Touch en la página de arduino.

#### 5.- Cuestionario:

- a.- Escriba el modelo de la pantalla utilizada
- b.- Que librerías se necesitan para poder trabajar con la pantalla?
- c.- Escriba la programación de la pantalla
- d.- Elabore conclusiones y recomendaciones

## 5.2. Manual de Uso y Operación

### **MANUAL USUARIO DEL SISTEMA MODULAR DIDÁCTICO PARA CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**

El presente manual contiene el procedimiento para la manipulación de todo el contenido adjunto, facilitando a la(s) persona(s) que analice(n) el material presentado en el proyecto de titulación el complemento de todo lo expuesto de manera descriptiva con el módulo desarrollado.



**¡ATENCIÓN!** Instrucciones y advertencias para un uso seguro.

Antes de utilizar el módulo lea atentamente las instrucciones para el uso y en concreto las advertencias para la seguridad, asegurándose de respetarlas.

Conserve este manual, junto con la guía ilustrativa durante toda la vida útil del módulo, para poder consultarlo cada vez que sea

## 1. DECLARACIÓN DE ADVERTENCIAS

Durante este manual, las declaraciones importantes se sitúan fuera del texto principal con un icono y una palabra de señal asociada: “Peligro”, “Advertencia”, “Precaución” o “Nota”. El icono y palabra de señal indican la importancia del estado o situación. Asegúrese de leer estas declaraciones y ponga especial cuidado a la hora de seguir las instrucciones.

Descripción	Ejemplo
<p><b>Peligro significa que existe un estado o situación que</b> provocará la muerte o lesiones graves <b>si no siguiera las instrucciones proporcionadas</b></p>	<p> <b>PELIGRO:</b> <i>no manipular las fuentes de alimentación conectada la alimentación.</i></p>
<p>Advertencia <b>significa que existe un estado o situación que</b> provocará lesiones moderadas <b>si no siguiera las instrucciones proporcionadas.</b></p>	<p> <b>ADVERTENCIA:</b> <i>No ponga nunca las manos junto con la niquelina si está encendida.</i></p>
<p>Precaución <b>significa que</b> podrían producirse lesiones menores o daños en la máquina <b>si no sigue las instrucciones proporcionadas. También puede que tenga que iniciar un procedimiento si no siguiera las instrucciones en una declaración de precaución</b></p>	<p> <b>PRECAUCIÓN:</b> <i>Apague la máquina antes de realizar cualquier tarea de mantenimiento.</i></p>
<p>Nota <b>significa que el texto ofrece</b> información adicional, aclaración o consejos útiles.</p>	<p> <b>NOTA:</b> <i>Para el vaciado de los tanques siga estas directrices</i></p>

**MANUAL USUARIO DEL SISTEMA MODULAR DIDÁCTICO PARA  
CONTROL DE NIVEL, CAUDAL Y PRESIÓN PARA EL LABORATORIO DE  
AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS  
FUERZAS ARMADAS**

## 2. INTRODUCCIÓN



**PRECAUCIÓN:** Este módulo didáctico debe ser utilizado por personal formado y autorizado de conformidad con el manual del operador y con las instrucciones de seguridad para la operación segura de la máquina.



**NOTA:** Lea todas las advertencias, precauciones e instrucciones adecuadas antes de utilizar este módulo.

### 2.1. Leer antes de utilizar la máquina



**DANGER:** No manipular las fuentes de alimentación conectada la alimentación.

#### **Seguridad Básica:**

- Consulte sus códigos y regulaciones de seguridad locales antes de operar la máquina.  
Póngase en contacto con su distribuidor siempre que necesite abordar algún problema.
- Es responsabilidad del responsable del laboratorio el asegurarse de que ANTES de realizar cualquier tipo de trabajo, todo el personal involucrado en la práctica del

módulo, esté familiarizado con las instrucciones de operación y seguridad, antes provistas

- La máquina no está diseñada para usarse con líquidos diferente al agua, ya que puede dañar los instrumentos de medición por las diferentes propiedades físicas.

### **Seguridad Eléctrica:**

- La alimentación eléctrica debe satisfacer las especificaciones requeridas. Si se intenta hacer funcionar la máquina con cualquier otra fuente de alimentación, podría causar daños severos
- Nunca realice el mantenimiento de la máquina con la alimentación eléctrica conectada.
- No pulse [Pantalla principal] en el panel de mando antes de que la máquina este completamente encendida y el paro de emergencia desactivado.

### **Seguridad en el funcionamiento:**

- No haga funcionar esta máquina a menos que los niveles mínimos de agua sean adecuados. Cuando el programa está ejecutándose, no se debe
- [EMERGENCY STOP] (parada de emergencia) es el botón rojo circular y grande ubicado en el panel de mando.

Cuando pulse [EMERGENCY STOP] (parada de emergencia), las bombas, las electroválvulas, la niquelina, se paran. Mientras esté activo [EMERGENCY STOP] (parada de emergencia), el movimiento automático y manual estará

deshabilitado. Utilice [EMERGENCY STOP] (parada de emergencia) en caso de emergencia, y también para deshabilitar la máquina por motivos de seguridad.

- Inspeccione si hay partes y herramientas dañadas antes de hacer funcionar la máquina. Toda pieza o herramienta que haya sido dañada, debe ser adecuadamente reparada o reemplazada por personal autorizado. No haga funcionar la máquina si sospechara que alguno de los componentes no estuviera funcionando correctamente

### 3. USO

Consulte la figura [A] de la guía ilustrativa del manual de instrucciones.

Patalla con botones sirven para el control de las variables separados en cuatro subsistemas:

#### *Botón de Presión*

**ACTUAL:** Muestra la presión actual del del sistema.

+ : Aumentar el valor del set-point.

- : Disminuir el valor del set-point.

#### *Botón de Caudal*

#### *Botón de Nivel*

**ACTUAL:** Muestra el nivel actual Sistema.

+ : Aumentar el valor del set-point.

- : Disminuir el valor del set-point.

#### *Botón de Temperatura*

**ACTUAL:** Muestra el caudal actual del sistema.

**+:** Aumentar el valor del set-point.

**- :** Disminuir el valor del set-point.

**ACTUAL:** Muestra el nivel actual sistema.

**TEMPERAR:** Enciende la niquelina hasta la temperatura seteada previamente.

#### 4. CONSERVACIÓN

Si no va a utilizarse el módulo desenchúfelo, retírele el agua y manténgalo en un lugar seco y protegido del polvo.

Enrolle el cable de alimentación sobre sí mismo sin que quede demasiado apretado y sin doblarlo.

#### 5. LIMPIEZA

Se debe limpiar primero los tanques vaciándolos, y después se debe limpiar las paredes y sus fondos.

Con un compresor de aire hacer circular aire para que no exista obstrucción en la tubería, y de haberla se la debe retirar.

Se debe cebar las bombas de agua.

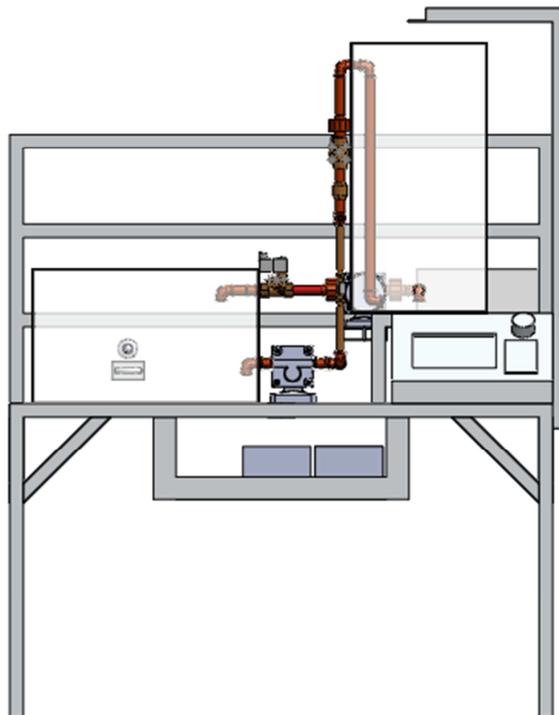
Es necesario seguir las instrucciones de mantenimiento para realizar la limpieza del módulo.

#### 6. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO [FIG. A]

*1 Mesa soporte*

- 2 *Tanque principal*
- 3 *Tanque secundario*
- 4 *Bomba principal*
- 5 *Bomba secundaria*
- 6 *Electroválvula principal*
- 7 *Electroválvula secundaria*
- 8 *Sensor de Nivel*
- 9 *Sensor de temperatura*
- 10 *Sensor de caudal*
- 11 *Sensor de Presión*
- 12 *Niquelina*
- 13 *Tubería*
- 14 *Panel de control*
- 15 *Panel de mando*

7. FIGURA



## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- El proyecto realizado cumple con los objetivos propuestos de diseñar y construir un sistema modular didáctico para regular nivel, caudal, presión y temperatura, mediante la utilización de la tarjeta de control arduino mega 2560.
- El sistema diseñado proporciona flexibilidad, ya que se han desarrollado cuatro procesos de regulación, lo que permite la realización de distintas prácticas de laboratorio.
- Se diseñó un sistema de tanques acoplados para almacenamiento y tratamiento de líquidos en el cual se optimizó la regulación de las variables.
- Mediante el proceso de mejora continua se implementaron controles, realizando diversas pruebas y ensayos que permitieron que estos sean eficientes y eficaces.
- Para la visualización y mando de los procesos de regulación se utilizó una pantalla táctil TFT-LCD, la que es controlada por una tarjeta arduino mega 2560, que a su vez se comunica con la tarjeta de control mediante comunicación serial.
- Los instrumentos seleccionados cumplen con los requerimientos de diseño para el sistema modular didáctico, ya que permiten al usuario manejar las variables de regulación en rangos apropiados para prácticas de laboratorio.
- Para garantizar la seguridad del usuario y del equipo se seleccionaron fuentes encapsuladas de voltajes fijos con sus debidas protecciones, además se separó físicamente el arreglo de las fuentes de poder y los circuitos electrónicos.
- Los circuitos electrónicos diseñados garantizan la eficiencia en el proceso, además permiten comprobar el funcionamiento o si existen fallos de una manera rápida y sencilla.
- Se comprobó que la utilización de una bomba dc con control PWM, sustituye el uso del sistema bomba y electroválvula proporcional, con resultados eficientes y a un menor costo.

- El uso de una bomba dc con control PWM a nivel industrial se limita por el alto costo comparada con el uso de una bomba ac regulada por un variador de frecuencia.
- Para la medición de temperatura en rangos moderados como el del sistema modular didáctico es preferible utilizar un sensor tipo PT100 en lugar de una termocupla, ya que la señal de salida es prácticamente lineal, facilitando el diseño del circuito de acondicionamiento.

## **6.2. Recomendaciones**

- Seguir el procedimiento descrito en el manual de usuario y mantenimiento con el fin de garantizar la seguridad del operario y el funcionamiento idóneo del equipo.
- Para evitar daños en el equipo se debe vigilar que los niveles de agua en el tanque de almacenamiento y en el tanque de control, no estén por debajo del límite de las bombas.
- Se puede mejorar el sistema ubicando sensores de nivel mínimo y máximo en el tanque de almacenamiento para asegurar que la bomba puede trabajar sin sufrir averías.
- Para garantizar el funcionamiento correcto y el tiempo de vida del sistema modular se recomienda al laboratorio implementar la realización de las prácticas dentro de la currícula académica con la debida vigilancia de un tutor.

## Bibliografía

- Acilico y Policarbonato. (2015). *Propiedades del acrílico*. Obtenido de Acilico y policarbonato.com: <http://www.acilico-y-policarbonato.com/acilico-propiedades.html>
- Agelet, O. X. (2000). *Mecánica de medios continuos para ingenieros*. Barcelona: UPC. Obtenido de <http://andrearojasgomez.galeon.com/>
- Ander. (30 de 01 de 2015). *Zona libre*. Obtenido de Ander: [http://ander.zonalibre.org/MEDICION%20DE%20PRESION\\_1.pdf](http://ander.zonalibre.org/MEDICION%20DE%20PRESION_1.pdf)
- Arduino. (2015). *Arduino mega 2560*. Obtenido de <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- Benitez, L. (25 de Marzo de 2005). *Termopar (funcionamiento)*. Obtenido de [commons.wikimedia.org/wiki/file:Termopar\\_\(diagrama\\_de\\_funcionamiento\)-LMB.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Termopar_(diagrama_de_funcionamiento)-LMB.png)
- Biblioteca Virtual de la Cooperación Internacional. (2012). *Medidores de nivel de agua*. Obtenido de [http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/3956/8/BVCI0003320\\_18.pdf](http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/3956/8/BVCI0003320_18.pdf)
- Bronzzo. (s.f.). *Válvula de pie*. Obtenido de [http://www.easy.cl/easy/ProductDisplayZoom?id\\_prod=88763&multi=N&canonical=http://www.easy.cl/easy/ProductDisplay?mundo=1;id\\_prod=88763;id\\_cat=0;tpCa=4;caN0=4178;caN1=5146;caN2=2969;caN3=0](http://www.easy.cl/easy/ProductDisplayZoom?id_prod=88763&multi=N&canonical=http://www.easy.cl/easy/ProductDisplay?mundo=1;id_prod=88763;id_cat=0;tpCa=4;caN0=4178;caN1=5146;caN2=2969;caN3=0)
- Bruzos, I., & Bruzos, L. (2013). *Indicador del Nivel de combustible del automóvil*. Obtenido de [Sabelotodo.org](http://www.sabelotodo.org): <http://www.sabelotodo.org/automovil/relojgasolina.html>
- Dakhma. (2013). *atractores rematicos y metaestabilidad*. Obtenido de [dakhma.blogspot.com/2013/05/atractores-tematicos-y-metaestabilidad.html](http://dakhma.blogspot.com/2013/05/atractores-tematicos-y-metaestabilidad.html)
- Danfoss. (2010). *Neumática proporcional*. Obtenido de [www.danfoss.com/Spain/NewsAndEvents/Archive/Industrial+Automation+News/Danfoss-le-ayuda-a-elegir-la-valvula-mas-adecuada-para-su-sistema-de-refrigeracion-hidraulica/93FE225D-9D3E-4BE9-AB6B-2031E6F2B0C1.html](http://www.danfoss.com/Spain/NewsAndEvents/Archive/Industrial+Automation+News/Danfoss-le-ayuda-a-elegir-la-valvula-mas-adecuada-para-su-sistema-de-refrigeracion-hidraulica/93FE225D-9D3E-4BE9-AB6B-2031E6F2B0C1.html)
- Direct Industry. (2015). *Electroválvula*. Obtenido de [www.directindustry.es/prod/airtac-automatic-industrial/electrovalvulas-2-2-vias-accion-directa-30479-811885.html](http://www.directindustry.es/prod/airtac-automatic-industrial/electrovalvulas-2-2-vias-accion-directa-30479-811885.html)
- Direct Industry. (2015). *INterruptor de nivel con flotador*. Obtenido de [www.directindustry.es/prod/aplisens-sa/interruptores-nivel-flotador-magneticos-acero-inoxidable-50547-489319.html](http://www.directindustry.es/prod/aplisens-sa/interruptores-nivel-flotador-magneticos-acero-inoxidable-50547-489319.html)
- EIA. (2013). *Hidráulica*. Obtenido de [eia.edu.co](http://fluidos.eia.edu.co): [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar\\_turbulento.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm)
- EMB.cl. (2013). *Electroindustria*. Obtenido de [emb.cl](http://www.emb.cl): <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=81>
- Faucets. (2011). *Válvulas Chek*. Obtenido de [www.fundicionpacifico.com/ferreteria/valvulas-check/valvulas-check.html](http://www.fundicionpacifico.com/ferreteria/valvulas-check/valvulas-check.html)

- FESTO. (27 de Noviembre de 2007). *Festo-didactic: Equipo compacto con regulación de nivel, caudal, presión y temperatura*. Obtenido de sitio web de Festo-Didactic: [http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/carta\\_anexo.pdf](http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/carta_anexo.pdf)
- Fisica.laguia2000. (2012). *Diagrama de moody*. Obtenido de fisica.laguia2000.com: <http://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/diagrama-de-moody>
- Forun. (2012).
- GuardMagic. (2014). *Tanques de almacenamiento de monitoreo remoto*. Obtenido de GuardMagic: [http://www.guardmagic.com/03-spain/01spa-shortly/4spa-storage-tank-monitoring/0spa-storage\\_tank\\_monitoring.htm](http://www.guardmagic.com/03-spain/01spa-shortly/4spa-storage-tank-monitoring/0spa-storage_tank_monitoring.htm)
- Inacap. (2012). *Sensores de nivel*. Obtenido de <http://snsosresdenivel.blogspot.com/>
- INOCOY. (2003). *Resistencias calentadoras*.
- Jean-Frnacois. (2008). *Instrumentación*. DULHOSTE - ULA. Obtenido de medicion de presion: [http://ander.zonalibre.org/MEDICION%20DE%20PRESION\\_1.pdf](http://ander.zonalibre.org/MEDICION%20DE%20PRESION_1.pdf)
- Kobold. (01 de Enero de 2007). *Medidor de Caudal tipo Turbina*. Obtenido de [http://www.kobold.de/sites/kobold.com/files/pdf/s4es\\_drs.pdf](http://www.kobold.de/sites/kobold.com/files/pdf/s4es_drs.pdf)
- López García, I. M. (agosto de 2007). *Medicion de caudal*. Obtenido de [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion\\_de\\_Caudal.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf)
- Martínez, A. (2007). *Conceptos básicos de Neumática e Hidráulica*. Obtenido de <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica16.htm>
- Meteolobios. (2013). *Meteolobios.es*. Obtenido de temperatura: <http://www.meteolobios.es/temp.htm>
- Miliarium. (2104). *Perdida de carga*. Obtenido de Prontuario miliarium.com: <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>
- Neumática Proporcional*. (s.f.). Obtenido de <https://renatosarce.files.wordpress.com/2011/11/cap8-neumatica-proporcional.pdf>
- PLASTIGAMA. (2015). *Linea Roscable PP*. Obtenido de Plastigama.com: [http://sitio.plastigama.com/producto/construccion/item/linea-roscable-pp-para-agua-caliente-y-fria.html?category\\_id=4](http://sitio.plastigama.com/producto/construccion/item/linea-roscable-pp-para-agua-caliente-y-fria.html?category_id=4)
- SHURFLO. (2011). *Fresh Water Pump Datasheet*.
- Soria, K. (17 de septiembre de 2013). *HC-SR04 Sensor Ultrasónico*. Obtenido de <http://bkargado.blogspot.com/2013/09/todosobrehc-sr04.html>
- Timer Pneumatic. (2007). *electroválvulas*. Obtenido de <http://neumatica-es.timmer-pneumatik.de/artikel/V1-Magnetventile/v1-magnetventile-1.html>
- TS LINE. (2012). PT100.
- Turboflow. (2012). Sensor de Flujo. *TurboFlow*.
- Universidad Don Bosco. (2006). *El PLC LOGO*. Obtenido de LOGO manual edición 3: <http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electrica-ingenieria/control-industrial/2015/i/guia5.pdf>
- Valvias. (2014). *Número de Reynolds*. Obtenido de Valvias.com: <http://www.valvias.com/numero-de-reynolds.php>
- Via Industrial. (2012). *Presostatos Industriales Tipo Bloque Compacto*. Obtenido de <http://www.viaindustrial.com.ec/producto.asp?codigo=157007>

Wikipedia. (125 de Enero de 2015). *Resistencia calentadora*. Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_calentadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_calentadora)