

**SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL CON TANQUES
ACOPLADOS**

**KAROL BIBIANA BOHORQUEZ VALDERRAMA
DIEGO FERNANDO FONSECA SANABRIA
SANTIAGO GUTIÉRREZ PUERTAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
MODALIDAD VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL
BOGOTÁ, D.C.
2017**

**SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL CON TANQUES
ACOPLADOS**

**KAROL BIBIANA BOHORQUEZ VALDERRAMA
DIEGO FERNANDO FONSECA SANABRIA
SANTIAGO GUTIÉRREZ PUERTAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Electrónicos y de
Telecomunicaciones**

**Director:
MSc. JOSÉ ROBERTO CUARÁN VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
MODALIDAD VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL
BOGOTÁ, D.C.
2017**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Firma del presidente jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 6 de noviembre, 2017

AGRADECIMIENTOS

Nos complace exteriorizar nuestras más sinceras complacencias a la Universidad Católica de Colombia en la facultad de Ingeniería electrónica y telecomunicaciones y en ella, al ingeniero José Roberto Cuarán como director de proyecto por su dedicación, comprensión y apoyo incondicional; y a los demás distinguidos ingenieros por destacarse por su labor como docentes que nos brindaron un valioso aporte en conocimiento a lo largo de todo este trabajo de grado, tanto en las aulas como fuera de ella, lo que nos constituyó como elementos fundamentales en la sociedad y en especial a la formación académica, de igual forma a las entidades e instituciones que nos permitieron disponer de información, espacios y elementos para el desarrollo de este proyecto y extender un inmensa gratificación a todos los que de una u otra manera se involucraron en este trabajo tendiéndonos sus manos en los momentos en los que más los necesitábamos y contribuyeron a nuestro desarrollo profesional, personal y ético.

Autores

DEDICATORIA

A Dios por habernos dado salud y fuerza en esta etapa tan importante de nuestras vidas y llegar a este punto tan indispensable para el logro de nuestros objetivos.

A nuestros amados padres y familiares por su inmenso cariño, apoyo incondicional y constante motivación que nos permitieron salir adelante y lograr la culminación de esta meta.

A nuestros amigos, profesores, asesores y demás personas que participaron de manera directa e indirecta en la realización de este proyecto de grado.

Autores

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	17
1.1. ANTECEDENTES.....	17
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3. OBJETIVOS.....	24
1.3.1. OBJETIVO GENERAL:	24
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	24
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	25
1.5. DELIMITACIÓN	25
1.6. MARCO REFERENCIAL	26
1.6.1. MARCO TEÓRICO	26
1.6.1.1. Medición de nivel por ultrasonido	27
1.6.2. Estructura de un sistema de control.....	27
1.6.2.1. Sistema de control.	27
1.6.2.2. Sistema de control lineal.	28
1.6.2.3. Sistemas de control no lineales.....	29
1.6.2.4. Sistema de control multivariable.	29
1.6.2.5. Requerimientos generales de un sistema de control.....	30
1.6.2.6. Sistema de lazo abierto/cerrado.....	31
1.6.2.7. Sistema en lazo abierto.....	31
1.6.2.8. Sistema en lazo cerrado.....	31
1.6.3. Medición de flujo.....	32
1.6.3.1. Fluidos ideales.....	32
1.6.3.2. Fluidos reales.	33
1.6.4. Modelo de tanques acoplados.....	33
1.6.5. Flujo laminar.	35
1.6.5.1. Numero de Reynolds.....	35
1.6.6. Flujo turbulento.	35
1.7. MARCO CONCEPTUAL.....	36
1.7.1. Sensores de presión.....	36
1.7.1.1. Sensores mecánicos.....	36
1.7.1.2. Sensores neumáticos	38

1.7.1.3.	Sensores electromecánicos..	39
1.8.	VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL	43
1.8.1.	Sistema de esclusas canal de Panamá.	43
1.8.1.1.	Arribo y Fondeo de buques.	44
1.8.1.2.	Navegación.	44
1.8.2.	Maquinaria principal del Canal de Panamá.	45
1.8.2.1.	Instalaciones Electromecánicas.	46
1.8.2.2.	Componentes electromecánicos	47
1.8.3.	Sistema de distribución eléctrica	51
1.8.3.1.	Distribución de media tensión.	51
1.8.3.2.	Distribución de Baja Tensión.	51
1.8.3.3.	Generador de respaldo.	52
1.8.4.	Sistema Hidráulico.	53
1.8.4.1.	Unidad de Potencia Hidráulica.	53
1.8.4.2.	Estación de diagnóstico de HPUS (Hidraulic Power Unit).	53
1.8.4.3.	Tinas de reutilización de agua.	54
1.8.5.	Tránsito y funcionamiento general.	55
1.8.6.	Tipos de esclusaje	56
1.8.6.1.	Esclusaje de Línea de Mano.	56
1.8.6.2.	Esclusaje Regular.	56
1.8.6.3.	Esclusaje de Relevó.	56
1.8.6.4.	Esclusaje en Tándem.	57
1.8.7.	Sistema de Control de Maquinaria de Esclusas (SiCME).	58
1.8.7.1.	Sensores..	59
1.8.7.2.	Consolas HMI del Edificio de Control hasta el sensor.	60
1.8.7.3.	Software HMI.	60
1.8.7.4.	Power Distribution SCADA.	61
1.8.8.	Programa de Mantenimiento.	61
1.8.8.1.	Mantenimiento preventivo.	61
1.8.8.2.	Mantenimiento correctivo.	62
1.9.	METODOLOGÍA	63
1.9.1.	Diseño metodológico..	63
1.9.2.	Búsqueda y recopilación de información.	64
1.9.3.	Planificación.	65
1.9.4.	Construcción y ejecución.	66
1.9.5.	Seguimiento y evaluación.	66

1.9.6. Divulgación.	66
2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES	67
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	67
2.1.1. Sensor de flujo YF-s201 de SEA Electronics.	
2.1.2. Válvula solenoide 2W-160-15.....	68
2.1.3. Sensor ultrasonido HC-SR04.....	69
2.1.4. Bomba DC-12V.....	70
2.1.5. Arduino mega 2560.....	71
2.1.6. Modulo Relé De 2 Canales	73
2.2. MATERIALES.....	74
3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	75
4. IMPLEMENTACIÓN.....	77
4.1. MODELAMIENTO DE LOS TANQUES ACOPLADOS	84
4.1.1. Función de transferencia de los tanques acoplados.....	85
4.1.2. Función de transferencia de la bomba	90
→Función de transferencia total de la planta (véase la ecuación 24):.....	91
4.2. PROCEDIMIENTOS REALIZADOS Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO ...	92
4.2.1. Pruebas al sensor de flujo yf-s201 y bomba..	92
4.2.2. Pruebas sensor ultrasonido	95
4.2.3. Simulación de la función de transferencia obtenida.	96
4.2.4. Diseño y simulación del controlador PID	97
4.2.4.1. Simulación del Controlador PID con la planta.....	99
4.2.5. Prueba control en lazo cerrado - Control on/off.....	100
4.2.6. Inicio de llenado.....	101
5. DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	102
6. CONCLUSIONES	103
7. RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa	20
Figura 2. Esquema de dos tanques acoplados	21
Figura 3. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados	22
Figura 4. Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes	23
Figura 5. Medición de nivel por ultrasonido	27
Figura 6. Sistema general de un sistema de control	28
Figura 7. Representación de un sistema de control.....	30
Figura 8. Sistemas de control en lazo abierto	31
Figura 9. Sistema de control en lazo cerrado	32
Figura 10. Sistema de Tanques Acoplados	34
Figura 11. Sección interna tubo Bourdon.....	36
Figura 12. Funcionamiento espiral de presión para indicación	37
Figura 13. Sección interna funcionamiento sensor de diafragma	37
Figura 14. Funcionamiento sensor de fuelle	38
Figura 15. Funcionamiento sensor neumático	39
Figura 16. Sensores de inductancia variable	39
Figura 17. Sensores de reluctancia variable	40
Figura 18. Sensor capacitivo.....	40
Figura 19. Funcionamiento de membrana extenso métrica	41
Figura 20. Funcionamiento teórico en elementos piezoresistivos.....	42
Figura 21. Cámaras de las Esclusas del Canal de Agua Clara	43
Figura 22. Maquinaria	45
Figura 23. Composición típica de las esclusas	45
Figura 24. Compuerta tradicional.....	47
Figura 25. Compuertas rodantes	47
Figura 26. Componentes compuertas rodantes	48
Figura 27. Cámaras para el nuevo juego de esclusas	49
Figura 28. Locomotoras	50
Figura 29. Rieles conductores	51
Figura 30. Sistema de distribución.....	52
Figura 31. Generador de respaldo	52
Figura 32. Unidad de potencia hidráulica.....	53
Figura 33. HPU status.....	54
Figura 34. Tinas de reutilización de agua	54
Figura 35. Esclusaje línea de mano.....	56
Figura 36. Esclusaje Regular	56
Figura 37. Esclusaje de Relevó	57
Figura 38. Esclusaje en Tándem	57
Figura 39. SiCME.....	59
Figura 40. Consolas HMI del Edificio de Control hasta el sensor	60
Figura 41. SCADA	61
Figura 42. Flujograma del proceso	63
Figura 43. Agenda Visita Técnica Internacional.....	64

Figura 44. Cronograma de actividades	65
Figura 45. Dimensiones sensor de flujo yf-s201 de Sea Electronics	68
Figura 46. Válvula solenoide.....	68
Figura 47. Sensor de ultrasonido HC-SR04.....	69
Figura 48. Bomba DC-12V.....	71
Figura 49. Microcontrolador Arduino.....	72
Figura 50. Módulo de relés	73
Figura 51. Programación de entradas y salidas del sistema en LabView	76
Figura 52. Vista Frontal diseño 3ds Max.....	78
Figura 53. Vista Trasera diseño 3ds Max	78
Figura 54. Vista Trasera $\frac{3}{4}$ girado a la derecha diseño 3ds Max.....	78
Figura 55. Vista Lateral Izquierda diseño 3ds Max	79
Figura 56. Vista Trasera girada $\frac{3}{4}$ a la Izquierda diseño 3ds Max	79
Figura 57. Vista Trasera Aérea 45° diseño 3ds Max.....	80
Figura 58. Medidas Tanques	80
Figura 59. Inicio de acople de tubería.....	81
Figura 60. Acople de tubería.....	81
Figura 61. Tubería acoplada.....	82
Figura 62. Prueba de llenado y anti fugas	82
Figura 63. Primera interfaz para sensor de flujo	83
Figura 64. Interfaz Gráfica	83
Figura 65. Diseño tarjeta Tipo - Shield PCB WIZARD	84
Figura 66. Sistema didáctico de tanques acoplados.....	84
Figura 67. Sistema de tanques acoplados.....	86
Figura 68. Circuito eléctrico	86
Figura 69. Método de nodos.....	89
Figura 70. Característica de la bomba.....	90
Figura 71. Conexión sensor de flujo con Arduino	92
Figura 72. Pendiente Litros por número de pulsos	94
Figura 73. Tiempo de llenado en litros.....	94
Figura 74. Pruebas obtenidas sensor HC-SR04.....	95
Figura 75. Simulación función de transferencia en Simulink Bloques.....	96
Figura 76. Simulación función de transferencia en Simulink.....	96
Figura 77. Respuesta del sistema con una entrada escalón	97
Figura 78. Código Matlab.....	97
Figura 79. Visualización de información y acciones de diseño	98
Figura 80. Respuesta del controlador mediante Sisotool.....	99
Figura 81. Simulación en Simulink PID.....	99
Figura 82. Respuesta del controlador PID con la planta.....	99
Figura 83. Visualización de los umbrales de cada tanque	100
Figura 84. Interfaz gráfica en LabView 2016	101
Figura 85. Ingreso de los umbrales deseados	101
Figura 86. Diagrama de conexiones.....	109
Figura 87. Manual de uso.....	111
Figura 88. Sistema de tanques acoplados.....	113
Figura 89. Interfaz gráfica en LabView 2016.....	113
Figura 90. Diagrama de boques controlador PID.....	114
Figura 91. Interfaz LabView controlador PID.....	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medidas de las compuertas de Agua Clara y Cocolí	48
Tabla 2. Maquinaria y sus cantidades.....	49
Tabla 3. Dimensiones válvulas de alcantarilla	49
Tabla 4. Dimensiones válvulas de ecualización.....	50
Tabla 5. Dimensiones válvulas de conducto.....	50
Tabla 6. Tipos de motores HPU.....	53
Tabla 7. Restricciones de los Buques.....	55
Tabla 8. Características del sensor de flujo	67
Tabla 9. Características de la válvula solenoide	69
Tabla 10. Especificaciones técnicas bomba	71
Tabla 11. Especificaciones Arduino Mega	72
Tabla 12. Características técnicas Módulo Relé	73
Tabla 13. Variables generalizadas.....	86
Tabla 14. Valores de voltaje y caudal adquiridos experimentalmente en la bomba.....	90
Tabla 15. Muestras del sensor de flujo	92
Tabla 16. Muestras de la bomba.....	93
Tabla 17. Caracterización sensor HC-SR04	95
Tabla 18. Descripción económica del proyecto	102
Tabla 19. Distribución de pines.....	110

GLOSARIO

ACTUADOR: Es un dispositivo que tiene la capacidad de realizar la activación de algún proceso generando un efecto en el sistema que lo contiene. Por lo general recibe la señal de un controlador para ejercer su función según sea necesario.

ANALÓGICO: Representación de un tipo de señal mediante funciones matemáticas continuas de variables físicas en función del tiempo.

ARDUINO: Es una placa de desarrollo, cuyo hardware se compone por un circuito impreso que posee un microcontrolador, puertos de entrada y salida denominados como analógicos/digitales. Se alimenta mediante puerto USB y una conexión a una computadora.

BOMBA SUMERGIBLE: Es un dispositivo que posee un impulsor en interior que se encuentra sellado. Proporciona fuerza de elevación para bombear el líquido necesario.

CAUDAL: Se define como la cantidad de fluido que circula por alguna superficie por unidad de tiempo.

COMUNICACIÓN: Proceso por el cual se establecen conductos para la recepción y transmisión de datos por medio de los diferentes dispositivos para luego ser procesados.

CONTROL: Seleccionar o manipular los posibles estados de un sistema mediante sus entradas y salidas.

DIDÁCTICO: Proceso que se encarga de articular un proyecto de carácter pedagógico, desarrollando e implementando técnicas de aprendizaje de enseñanza.

DIGITAL: Variable que solo puede tener valores discretos. Contiene información que inicialmente fue analógica pero que sufrió un proceso de transformación.

ENTRADA: Variable inicial del sistema que cumple ciertas condiciones, se incorpora como dato primario para su procesamiento.

INTERFAZ: Dispositivo que tiene la capacidad de transformar las señales generadas por las variables de entrada en información comprensible para las variables de salida. Medio gráfico para evidenciar el funcionamiento del prototipo implementado.

MEDICIÓN: Es un proceso que consiste en comparar un patrón o cantidad obtenida de manera teórica, con una muestra tomada de manera práctica convencional.

NIVEL: Altura alcanzada por el líquido respecto una línea de referencia.

SALIDA: Variable que se obtiene al procesar una variable de entrada. Pueden adoptar formas diferentes dependiendo de su parámetro de configuración.

SENSOR: Dispositivo que tiene la capacidad de detectar o medir magnitudes físicas y transformarla en variables o pulsos eléctricos.

TANQUE: Es una estructura utilizada para guardar o preservar líquidos, se utiliza principalmente en plantas industriales para procesos de refinería y destilación.

VÁLVULA: Es un dispositivo mecánico capaz de abrir o cerrar el paso de un fluido mediante piezas móviles obstruyendo los conductos. Sirven para regular, modular, aislar, conectar y desconectar cualquier tipo de instalación.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como finalidad realizar el diseño y construcción de un sistema para el control, medición y monitoreo de variables que se presentan en procesos industriales, como lo son el nivel y el caudal de líquido. Para tal fin, se emplean los conocimientos obtenidos en la Visita Técnica Internacional al Canal de Panamá sobre el procedimiento de llenado y vaciado de esclusas mediante el principio básico de gravedad, aplicando los conceptos necesarios para su utilización en el desarrollo teórico-práctico del prototipo.

El sistema de control está compuesto por un tanque reservorio encargado de almacenar el líquido y mediante una bomba sumergible, transportarlo a través de tubería instalada hacia el tanque principal. A la entrada del tanque, se encuentra un sensor de caudal, que se encarga de hacer la medición de la señal actuante. Además, este tanque se encuentra acoplado con el secundario por medio de una válvula que actúa como un conducto que se abre o se cierra permitiendo el paso de líquido.

Para la medición del nivel de cada tanque, se emplean sensores de ultrasonido. Su función es calcular la distancia a la que se encuentra el líquido dentro del tanque a medida que va aumentando o disminuyendo. Adicional a esto, el prototipo cuenta con un sistema de desagüe compuesto por dos válvulas manuales ubicadas en la parte trasera de los tanques que se encargan de realizar perturbaciones al sistema y dar paso al proceso de vaciado.

Las funciones de control, medición y monitoreo se desarrollan en LabView 2016 por medio de una interfaz gráfica que le otorga al usuario la posibilidad de interactuar en tiempo real con el prototipo, evidenciando cambios y características presentadas en los parámetros de cada una de las variables de entrada y salida del sistema. Asimismo, las guías de trabajo implementadas se presentan como una solución de relacionamiento del estudiante con el ámbito industrial por medio del desarrollo de conceptos básicos en instrumentación electrónica y control automático.

Palabras claves: Caudal, Interfaz, Nivel, Sensor, Tanque.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las empresas cuentan con procesos industriales, entre ellos el control de nivel de sustancias en tanques. Este proceso requiere de técnicas de concentración, tanques de mezcla y procesos de fundición. Un sistema de nivel proporciona el control necesario para la producción y almacenamiento de sustancias con diversas reacciones químicas que dependen de las variables a medir y los componentes completos del sistema. A nivel académico, el uso de tanques acoplados contribuye para el estudio y desarrollo de sistemas de control lineal y no lineal, además de otorgar una manera didáctica para realizar prácticas de laboratorio encaminadas a la solución de problemáticas a menor escala.

En este trabajo de grado se desarrolla un sistema didáctico de tanques acoplados para el control de nivel y flujo. Para ello se lleva a cabo el sensado de variables físicas, haciendo posible la implementación de diversos lazos de control que analicen las señales obtenidas de manera lógica, sistemática y analítica, para generar posibles soluciones a problemas en la industria y la academia en general.

También son necesarios elementos como bombas que llevan el líquido desde el fondo hasta el tope del tanque y válvulas que regulan el flujo entre tanques, proporcionando modelos experimentales de múltiples entradas y múltiples salidas.

Para que los usuarios tengan mayor interacción con el control del sistema de tanques y su estado, se desarrolla una interfaz que muestra las variables sensadas y su variación en tiempo real, permitiendo una supervisión completa del sistema e interviniendo en el proceso cuando sea necesario. Los datos obtenidos de manera práctica se pueden cotejar con los teóricos, mediante su transmisión hacia una computadora. Con la ayuda de guías sencillas de trabajo este sistema podría ser de gran ayuda en la enseñanza de tópicos de control e instrumentación electrónica.

El presente trabajo de grado se implementa para el laboratorio de control de la Universidad Católica de Colombia, mediante la aplicación de los conceptos adquiridos en la carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y una visita técnica internacional a las esclusas del Canal de Panamá. Además, se incluyen los resultados posibles de apropiación y transferencia tecnológica al país gracias a una serie de conferencias recibidas durante esta visita, que aportaron la información necesaria sobre aspectos hidráulicos y de infraestructura, complementando la investigación previa realizada y proporcionando los conocimientos suficientes para el desarrollo del sistema en cuestión.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

En los procesos industriales es frecuente encontrar sistemas que requieren controlar el nivel de dos o más tanques, cuyo comportamiento dinámico depende del caudal resultante de otros tanques, ante esto, la estrategia de control debe considerar que cada parámetro puede mostrar una fuerte dependencia y por ende su respuesta ante un estímulo se hace imprevisible.

Los sistemas de nivel de líquido representan un ejemplo concreto de sistemas de control con amplia difusión en medios industriales. Todo proceso que necesite almacenar sustancias en cualquiera de sus estados requiere realizar registros sobre el nivel de depósito de las mismas. Algunos de los sectores en los que es de gran importancia mantener el nivel de líquido entre parámetros previamente establecidos son: la industria petroquímica, la producción de papel, el tratamiento de aguas y procesos químicos, en los que por el grado de riesgo por contacto humano se requieren procedimientos automatizados.

A nivel didáctico, en varias universidades se han desarrollado diferentes configuraciones de tanques. Así, por ejemplo, en la Universidad del Cauca se realizó una simulación y modelamiento de un proceso de control de nivel para tanques obteniendo un sistema de modelos dinámicos en Matlab R2013a. En dicho proceso se deseaba obtener un modelo dinámico de nivel de un tanque utilizando las leyes de balance de masa y energía, proceso igualmente desarrollado por la herramienta Simulink.¹

También en el año 2010 en la Universidad de Tecnológica de Pereira se desarrolló una tesis para controlar y medir el nivel de líquido a través de un sensor de presión diferencial; este consistía en utilizar dicho sensor, ejercía un control de nivel de líquido en un sistema hidráulico y así controlar los niveles de un sistema de llenado y vaciado mediante un autómata programable Siemens.²

En la Universidad de Córdoba en el año 2011 se realizó un sistema de cuatro tanques acoplados, la cual es un proceso de una matriz multivariable [2x2] en el que se buscó controlar el nivel de dos depósitos mediante la tensión de dos bombas que alimentaban a los tanques inferiores bajo control y dos tanques

¹ CARLOS GAVIRIA. (2007). Modelado y simulación de un proceso de nivel [en línea]. Popayán. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad del Cauca. Disponible en Internet:

<ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Teoria_Sistemas_Lineales/Archivos%20curso/MapleMatlab/Cap2/Ejemplo%20Modelo%20Nivel/control%20de%20nivel.pdf>

² JOHN ALEXANDER VARGAS LOZADA, ALEJANDRO MARULANDA GRAJALES. (2010). Control y medida de nivel de líquido por medio de un sensor de presión diferencial [en línea] Pereira. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en Internet:

<<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1772/6298A696.pdf?sequence=1>>

superiores que producían el acoplamiento entre las entradas y las salidas del sistema.³

En el año 2016, en la Universidad de Piura en Perú se puso en funcionamiento una planta de control para un sistema de tanques acoplados, donde se destacaron varios tipos de control, entre ellos, un controlador PID que permitía controlar el nivel por medio de dos electrobombas. Dentro de este mismo sistema, se implementó un controlador MPC y se desarrolló un modelo matemático aplicando ecuaciones diferenciales, leyes físicas y transformadas de Laplace.⁴

En la Escuela Politécnica de Quito se construyó un módulo didáctico para el control de nivel de líquidos destinado a la implementación de un laboratorio de procesos industriales, que permite realizar acciones de control sobre la variable nivel por medio de control manual para cada pieza o automático, en el cual, se requiere del ingreso de un nivel deseado para dar inicio al sistema.⁵

En la Universidad de Murcia en España se destaca el sistema de laboratorio virtual, en el cual se propuso un sistema de tres tanques acoplados con acceso remoto vía internet para que los estudiantes tuvieran la oportunidad de realizar experimentos con equipamiento real desde cualquier ubicación, a cualquier hora y utilizando su propio espacio.⁶

También, en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en Guayaquil-Ecuador se implementó el diseño y la instrumentación de un sistema de tanques acoplados para prácticas de laboratorio universitario, basado en una tarjeta bus estándar para conectar dispositivos periféricos directamente a la placa base, un elemento variador y una bomba.⁷

En la Escuela Politécnica Nacional en Quito, se aplicó un control predictivo para mantener el nivel de líquido en un prototipo de proceso industrial, compuesto por tres tanques acoplados para representar sistemas de primero, segundo y tercer

³ G. CASTELO. (2011). Ajuste, configuración y control de cuatro tanques acoplados [en línea]. Montería. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad de Córdoba. Disponible en Internet: <<http://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIX/pdf/203.pdf>

⁴ PETER SAUL GUTARRA CASTILLO. (2011). Modelación y control de un sistema de tanques acoplados [en línea]. Perú. [citado 15 de octubre, 2017]. Universidad de Piura. Disponible en Internet: <<http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/CONCYTEC/232/1/Tesis%20-%20Gutarra%20Castillo%20Peter%20Sa%C3%BAI.pdf>

⁵ VICTOR MANUEL CADENA. (2005). Construcción y modelación de un sistema de control de nivel de líquidos [en línea]. [citado 15 octubre, 2017]. Escuela Politécnica. Disponible en Internet: <<http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel2.pdf>

⁶ FABREGAS, Ernesto. FARIAS, Gonzalo. DORMIDO, Sebastián. ESQUEMBRE, Francisco. Developing a remote laboratory for engineering education. Computers & Education. ISSN 0360-1215, Elsevier. (2011). Volumen 57, Issue 2, pp 1686-1697

⁷ LEYES, Jennifer. NAVARRETE, Darío. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabView. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Trabajo de grado (Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica y Automatización Industrial). 2007, p.10

orden con dos submódulos principales (analógico y digital) para realizar el control de la planta cumpliendo con los requerimientos asignados al sistema.⁸

En Valliammai Engineering College, India, se realizó la comparación de los controladores PID, IMC y lógica difusa (véase la Figura 1), donde se pudieron evidenciar ciertas ventajas de estos dos últimos sobre el primero. Este sistema de tanques funciona a nivel químico industrial, manejando corrientes y reacciones químicas por medio de agentes compuestos y un reactor que determina los parámetros desencadenados cuando se induce una reacción de segundo orden.

Algunas de estas variables son:⁹

$Q1(t)$ = Flujo de alimentación del reactivo A. (Litro/Segundo).

$Q2(t)$ = Flujo de agua que alimenta al reactor. (Litro/Segundo).

$Q3(t)$ = Flujo de salida inmediata del reactor. (Litro/Segundo).

A= Componente Reactivo. (mol/Litro)

B= Componente Reactivo. (mol/Litro)

$CA1(t)$ = Concentración del compuesto A en la corriente de alimentación. (mol/Litro)

$CA3(t)$ = Concentración del compuesto A a la salida exacta del reactor. (mol/Litro)

$CA4(t)$ = Concentración del compuesto A a la distancia L del reactor. (mol/Litro)

V= Volumen del reactor. (Litro).

$CB1(t)$ = Concentración del compuesto B en la corriente de alimentación. (mol/Litro)

$CB3(t)$ = Concentración del compuesto B a la salida exacta del reactor. (mol/Litro)

$CB4(t)$ = Concentración del compuesto B a la distancia L del reactor. (mol/Litro)

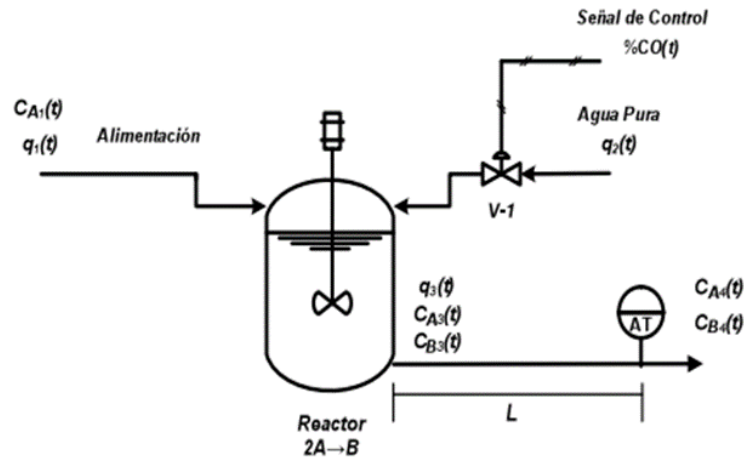
$\%CO(t)$ = Señal enviada por el controlador. (%)¹⁰

⁸ BENITES, Diego. Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos. Quito, Ecuador. Escuela Politécnica Nacional. Facultad Escuela de Ingeniería. 1994, p. 11

⁹ HARIVIGNESH, A. System Identification and Design of controllers For a Hybrid Tank System. Madurai, India. K.L.N. College of Engineering. IEEE International Conference on Innovations in Engineering and Technology, 2014, p. 2

¹⁰ *Ibíd.*, p.2.

Figura 1. Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa



Fuente: HARIVIGNESH, A. System Identification and Design of controllers For a Hybrid Tank System. Madurai, India. K.L.N. College of Engineering. IEEE International Conference on Innovations in Engineering and Technology, 2014, p. 2

En National University of Sciences & Technology, Karachi, Pakistan¹¹ y Gheorghe Asachi Technical University of Iași, Rumania¹², también se trabajó la modelación matemática no lineal de sistemas híbridos de tanques conectados, con estrategia de control predictivo para el control de nivel de uno y dos tanques. Las variables que allí intervienen son (véase la Figura 2):

LIC= Liquid Level Control. (Control de nivel de líquido).

LT1= Level Tank 1. (Nivel del tanque 1).

LT2= Level Tank 2. (Nivel del tanque 2).

L1= Nivel tanque 1.

L2= Nivel tanque 2.

A1= Área transversal tanque 1.

A2= Área transversal tanque 2.

FV1= Fuerza aplicada por la válvula 1.

FV2= Fuerza aplicada por la válvula 2.

R1= Válvula manual 1.

R2= Válvula manual 2.

R12= Válvula de interconexión tanques 1 y 2.

Fe12= Fuerza aplicada por la válvula de interconexión tanques 1 y 2.

Fe1= Fuerza aplicada por la válvula manual 1.

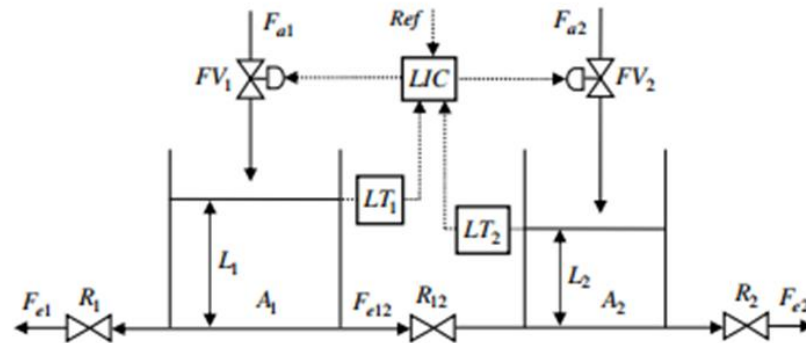
Fe2= Fuerza aplicada por la válvula manual 2.¹³

¹¹ KHALID, Muhammad. KADRI, Muhammad. Liquid Level Control of Nonlinear Coupled Tanks System using Linear Model Predictive Control. Islamabad, Pakistan. Emerging technologies (ICET), 2012.

¹² STINGA, Florin. SOIMU, Andreea. Hybrid Modelling and control for a two-tank system. Craiova, Rumania. University of Craiova, 2010.

¹³ Ibíd., p.3

Figura 2. Esquema de dos tanques acoplados



Fuente: KHALID, Muhammad. KADRI, Muhammad. Liquid Level Control of Nonlinear Coupled Tanks System using Linear Model Predictive Control. Islamabad, Pakistan. Emerging technologies (ICET), 2012.

En Colombia se destacan algunos trabajos, entre ellos, el de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Allí se planteó una solución para la industria de tintorerías locales a partir de un control de nivel con el fin de surtir la suficiente agua para la generación de energía térmica y de esta manera mejorar el proceso de lavado de prendas.¹⁴

En la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad de Santander, se realizó la instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados para el laboratorio de dicha universidad, debido a que el laboratorio no estaba en óptimas condiciones para desarrollar de manera satisfactoria las sesiones de laboratorio de control e instrumentación (véase la Figura 3).¹⁵

¹⁴ ARANGO, Sandra. Desarrollo el sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. Medellín, Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). 2004.

¹⁵ PEÑARANDA, Claudia. SILVA, Wilson. GÓMEZ, Eulices. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Trabajo de grado (ingeniero electrónico) - (ingeniero electricista). 2014

Figura 3. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados



Fuente: PEÑARANDA, Claudia. SILVA, Wilson. GÓMEZ, Eulices. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Trabajo de grado (ingeniero electrónico) - (ingeniero electricista) 2014.

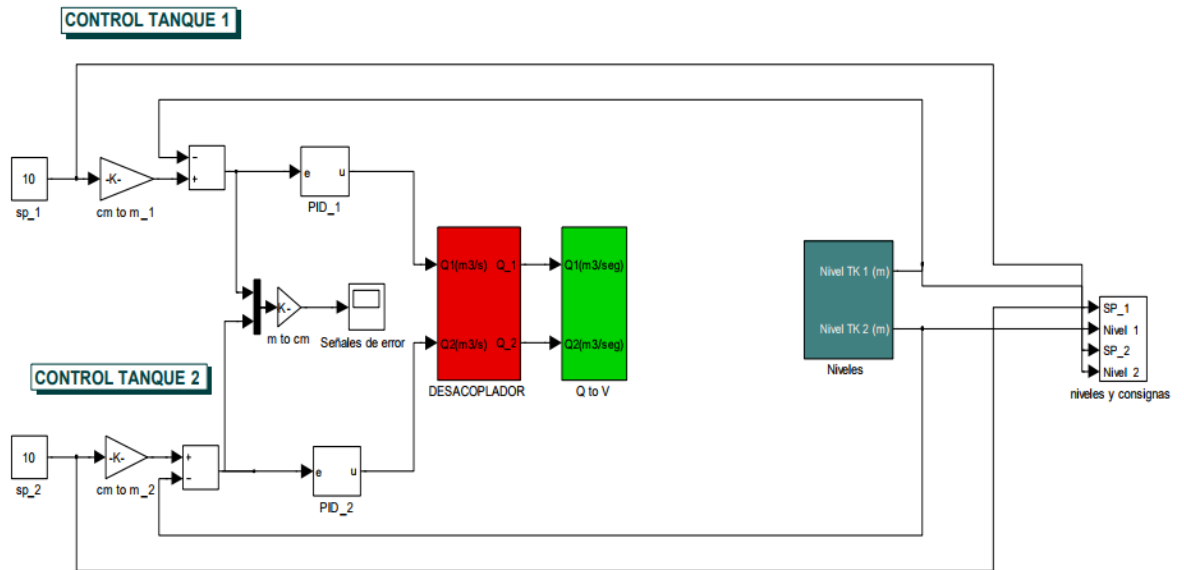
Además, en la feria denominada “AUTOMATISA 2013” en Bogotá, se expuso la implementación de un control PID desacoplado para controlar el nivel de dos tanques mediante una planta multivariable, que tomaba en cuenta los disturbios en los caudales a la entrada y salida del diseño y permitía que el agua se encontrara circulando constantemente por un circuito hidráulico evidenciando características y resultados favorables, tales como la disminución de iteración entre lazos y mediciones para considerarlo como un sistema de simple entrada-simple salida (véase la Figura 4).¹⁶

En la Universidad Nacional de Colombia en Manizales, se diseñó un sistema automatizado de control de nivel para la industria de lácteos en el eje cafetero, compuesto por envasadoras verticales, llenadoras y selladoras que trabajan con diferentes elementos de lazos de control requeridos para el funcionamiento general de la planta.¹⁷

¹⁶ AGUILAR, A.C. CASTRO, O. C. OBANDO, F. F. Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes. Bogotá, Colombia. International Society of Automation, IV Automatisa, 2013.

¹⁷ GIRALDO, Indira. Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y arquitectura posgrado en automatización industrial. Trabajo de grado (maestría). 2004

Figura 4. Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes



Fuente: AGUILAR, A.C. CASTRO, O. C. OBANDO, F. F. Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes. Bogotá, Colombia. International Society of Automation, IV Automatista, 2013.

Por otro lado, la maqueta de tanques acoplados CE105 del fabricante TecQuipment, posee una bomba de diafragma que toma el fluido del depósito inferior y tras atravesar un transductor de caudal es dirigido al primero de los tanques. El flujo atraviesa un tubo de vidrio calibrado en el que está alojada una pieza metálica que oscila en este tubo dependiendo de la velocidad que tenga el fluido. Existen además tres válvulas de paso variable: dos de ellas (de desagüe) conectan el cada tanque con el depósito inferior y la otra permite el flujo entre los dos tanques. Además, la maqueta está preparada para trabajar con una segunda bomba que aporte fluido al tanque derecho y así permitir la operación con un sistema multivariable (con dos entradas al sistema). El tanque izquierdo está conectado a un transductor de presión de profundidad capaz de proporcionar señales de salida en el rango de 0 a 10V en proporción directa con el nivel real de agua en cada tanque. Además, el nivel del líquido en cada uno de los tanques es claramente visible a través de las ventanas transparentes del panel frontal dotadas de una escala de calibración adyacente que permite observar los niveles de líquido reales en una escala de 0 a 250 milímetros.¹⁸

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El control de nivel y flujo de líquido entre tanques es un problema común en los procesos industriales. La creciente globalización, las normas de calidad y los altos estándares de producción constituyen los fundamentos principales para que los ingenieros se especialicen intensivamente en el control automático. Por ende, es indispensable el estudio y análisis de variables que intervienen, así

¹⁸ TecQuipment Ltd. Coupled Tanks Apparatus. Catálogo CE105/CE105MV

como el desarrollo de cada uno de los sistemas que se relacionan en diversos procesos de producción. Es necesario tener en cuenta aspectos técnicos para el funcionamiento de sensores y actuadores sobre los que se basan la tecnología de control y los sistemas de automatización.

Teniendo en cuenta el trabajo de grado: “Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (totally integrated automation) y adaptación de un proceso industrial para desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control” realizado en 2008,¹⁹ se puede inferir un alto presupuesto para su realización, lo cual no es garantía para su viabilidad a corto plazo.

Por otro lado, están los tanques acoplados que ofrecen empresas especializadas en la fabricación de equipos para control e instrumentación industrial como Festo²⁰ pero por sus elevados costos no pueden ser adquiridos.

Este trabajo de grado se constituye como una contribución en el desarrollo de actividades designadas a las asignaturas afines tales como control e instrumentación electrónica de la Universidad Católica de Colombia, a partir de la adecuación de la capacidad funcional de un sistema de tanques acoplados y desarrollados, con base en los conocimientos adquiridos en la búsqueda de información previa y la posterior visita técnica internacional.

En este trabajo de grado se responde a la pregunta: ¿Cómo desarrollar un sistema de tanques acoplados para experimentar alternativas de control que contribuyan a la enseñanza en el programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Colombia?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL:

Desarrollar un sistema didáctico de tanques acoplados para realizar prácticas de control.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar sensores, actuadores y materiales que se requieren para elaborar el sistema de tanques acoplados.

¹⁹ NEITA, Lidia. PRADA, Ricardo. Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (totally integrated automation) y adaptación de un proceso industrial para el desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) Disponible base de datos biblioteca UIS trabajos de grado. 2008

²⁰ FESTO DIDACTIC. FluidSIM Neumática Manual de usuario [en línea]. Denckendorf, Alemania. [citado 15 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/723058_fl_sim_p42_es_offset.pdf>

- Modelar el sistema didáctico de tanques acoplados y pueda ser utilizado como una herramienta en las materias afines a control.
- Implementar una interfaz que le permita al usuario modificar parámetros y visualizar el comportamiento del sistema.
- Realizar guías de trabajo asociadas al sistema propuesto.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La experimentación se puede definir como la comparación de los datos teóricos respecto a los prácticos. Para la enseñanza de sistemas de control se requiere disponer de plantas que posibiliten tomar mediciones en tiempo real y realizar cambios a las variables que inciden en su comportamiento, permitiendo identificar las posibles respuestas ante diferentes estímulos y a su vez, modelar correctamente un sistema de control que parametrize las variables presentes dentro del mismo.

La implementación de una solución pedagógica de tanques acoplados tiene gran relevancia para el desarrollo de diferentes prácticas que acerquen al estudiante al ámbito industrial, además de favorecer el marco teórico-conceptual para las materias relacionadas a la instrumentación industrial y al control automático.

El desarrollo del prototipo de tanques acoplados pretende establecer la oportunidad para que la comunidad universitaria efectúe las modificaciones pertinentes en beneficio de nuevas prácticas de laboratorio.

1.5. DELIMITACIÓN

El desarrollo del trabajo de grado se centra en la implementación de un sistema didáctico para el control de nivel de tanques acoplados, que consta de sensores y actuadores de tal manera que la planta diseñada simula adecuadamente un proceso industrial en el que se puedan aplicar varias técnicas de control que permite a los estudiantes de pregrado y posgrado conocer y manejar otros procesos y herramientas de laboratorio.

La visita técnica internacional se llevó a cabo en Panamá y tuvo una duración de 8 días, del 31 de julio al 7 de agosto del presente año. El tiempo de construcción del prototipo y sus documentos respectivos tomó un tiempo estimado de 5 meses (de junio a octubre) aproximadamente y su desarrollo se realizó en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia.

Se entregará la documentación de cada uno de los parámetros empleados para el desarrollo de la investigación, imágenes, implementaciones y resultados obtenidos, tales como un artículo, y un respectivo prototipo didáctico con un

manual de instrucciones de la planta. Además, se desarrollaron guías sencillas de trabajo para la experimentación y comprobación de los datos teóricos respecto a los prácticos obtenidos con el sistema didáctico de tanques acoplados.

Siguiendo el desarrollo del trabajo de grado, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se utilizaron sensores y actuadores acordes al prototipo a escala implementado que simula un sistema de tipo industrial. Además, presentan características similares que no generaron grandes impactos en la funcionalidad del proyecto, pero con limitaciones respecto a tamaño, potencia y velocidad de respuesta esperada.
- Puesto que es un sistema didáctico para laboratorio, la presentación del trabajo de grado, expondrá un ejemplo básico en el momento de la demostración, debido a que su uso es multivariado para todas las prácticas.

1.6. MARCO REFERENCIAL

1.6.1. MARCO TEÓRICO

- 1.6.1.1. Medición de Nivel.** En el ámbito industrial, se encuentran diversas variables en cuanto al control de almacenamiento de materias primas, tanto líquidas como sólidas, una de las variables más empleadas en la industria es el Nivel. Basados en la experiencia técnica, para seleccionar el tipo de medidor se prefiere el tipo de medidores estáticos y aquellos que no requieren de un contacto con el fluido y se ubican en lugares exteriores al recipiente, también aquellos medidores que poseen una mínima modificación en cuanto a la estructura del recipiente y a sus soportes, en la mayoría de los casos, cuando estos ya estén construidos.

Por otro lado, anteriormente, cuando había ausencia de la tecnología de los semiconductores, generalmente, estos métodos se fundamentaban en los principios mecánicos y/o neumáticos. Sin embargo, actualmente se dispone de gran variedad de técnicas de medición, aunque no resulta fácil su elección teniendo en cuenta la obtención de lecturas más adecuadas y que se adapten de una mejor manera a los requerimientos para cada instalación en específico. Estos métodos de medición se pueden clasificar, según su aplicación más común, de la siguiente manera²¹:

- Instrumentos de medida directa.

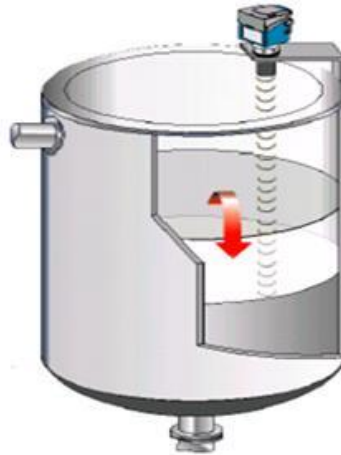
²¹ CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ª edición. Marcombo S.A.; 1997.

- Instrumentos basados en la presión hidrostática.
- Instrumentos basados en métodos electromecánicos.
- Instrumentos basados en medición de carga.
- Detección de nivel por método de horquillas vibrantes.
- Detección de niveles por conductividad.
- Medición de nivel por capacidad.
- Medición y detección de nivel por ultrasonidos.
- Medición y detección de nivel por microondas.
- Detección y medición radiométrica de niveles²².

Teniendo en cuenta el modelo para el proyecto de grado, el método de medición aplicado corresponde a la detección de nivel por ultrasonidos, el cual se explica a continuación:

- **Medición de niveles por ultrasonido.** Este método permite emitir por un sensor una medición del tiempo de retorno de pulso de sonido. Donde este pulso ultrasónico que se emite, se refleja en la superficie del producto y el mismo sensor permite que se vuelva a detectar. Se define como una medida indirecta de la altura de la sección vacía del tanque, el tiempo de retorno de la señal. Para ello, se afirma que, si a esta distancia se le resta la altura total del tanque, se logra obtener el nivel del producto. Para finalmente convertir el tiempo de retorno en una señal de salida analógica, tal y como se ilustra en la figura 5.²³

Figura 5. Medición de nivel por ultrasonido



Fuente: CREUS. *Ibíd.*, p. 26.

1.6.2. Estructura de un sistema de control

- 1.6.2.1. **Sistema de control.** Como primera medida, se define sistema dinámico aquel que recepta acciones externas o también

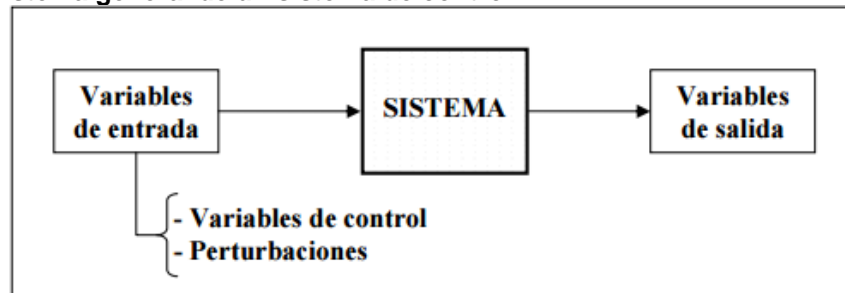
²² *Ibíd.*, p. 3.

²³ *Ibíd.*, p. 26.

denominadas variables de entrada, las cuales emiten más respuestas que son las llamadas variables de salida.

El objetivo de alcanzar valores prefijados se debe conseguir, mediante la manipulación de variables de control en el dominio de las variables de salida, para ello, se emplea un sistema de control que cuenta con la presencia de elementos que influyen en el funcionamiento del mismo (véase la Figura 6).²⁴

Figura 6. Sistema general de un sistema de control



Fuente: BROTONS ALVAREZ. (2004) ¿Qué es un sistema de control? [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>

1.6.2.2. Sistema de control lineal. Generalmente, en un sistema lineal, la salida debe seguir la misma forma de la entrada, incluyendo cambios o modificaciones presentadas. Sin embargo, existen casos en lo que esto no se cumple y es difícil poder clasificarlos como sistemas lineales.

Para comprender de mejor manera la definición anterior, se puede mencionar como ejemplo un integrador puro considerado también como un operador lineal. Ante una entrada escalón, la cual produce a la salida una señal rampa, se puede observar que dicha salida no es de la misma forma de la entrada, pero si la entrada escalón varía en una constante, la rampa de salida se verá modificada en la misma proporción.

Adicional a la definición citada anteriormente, vale la pena destacar que en el sistema de control lineal existen dos propiedades importantes:

- Si las entradas son multiplicadas por una constante, las salidas también son multiplicadas por la misma constante.

²⁴ LUIS ACEBES. (2002) Sistemas de control. [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf

- Los sistemas lineales se caracterizan por el hecho de que se puede aplicar el principio de superposición.²⁵

1.6.2.3. Sistemas de control no lineales. En la cotidianidad, los sistemas más comunes son los no lineales. Son aquellos sistemas que varían constantemente en el tiempo y que no siempre en su salida obtienen un mismo resultado, presentan mayor velocidad y precisión cuando se implementan de manera sencilla.

La teoría de control se encarga de estudiar el comportamiento de los sistemas dinámicos con entradas y sus respectivas modificaciones en las salidas por medio del uso de la retroalimentación. Por ejemplo, se puede plantear el diseño de un controlador que tiene la función de comparar la salida obtenida de la planta, con la hipotéticamente deseada, proporcionando así un lazo retroalimentado.²⁶

Como características específicas de este tipo de sistemas de control no lineales se mencionan las siguientes²⁷:

- No siguen principio de superposición.
- Pueden tener múltiples puntos de equilibrio aislados.
- Exhiben propiedades como límite, bifurcación y caos.
- Tiempo de escape finito.

1.6.2.4. Sistema de control multivariable. Aquellos sistemas con múltiples variables de entrada o múltiples variables de salida son denominados sistemas de control multivariable. Tienen como finalidad mantener una o más variables controladas en puntos de ajuste independientes. Presentan las siguientes características^{28,29}:

- Interacción entre las variables. Influye en el control de la estabilidad y el rendimiento.
- La factibilidad del control depende del proceso, no sólo de la relación causa-efecto.
- Alta sensibilidad al modelado de errores.

²⁵ MARIO ALBERTO PÉREZ. (2008) Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>

²⁶ SCIENCE DIRECT. A. I. LUR'E. V. N. POSTNIKOV. On the theory of stability of control systems, Applied mathematics and mechanics Control Systems [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-applied-mathematics-and-mechanics/vol/26/issue/1>>

²⁷ *Ibíd.*, p.5.

²⁸ PROCESS CONTROL EDUCATION. Multivariable Control [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://pc-education.mcmaster.ca/Textbook%20WEB%20book%20with%20updates/Marlin-Part%20V.pdf>>

²⁹ *Ibíd.*, p.3.

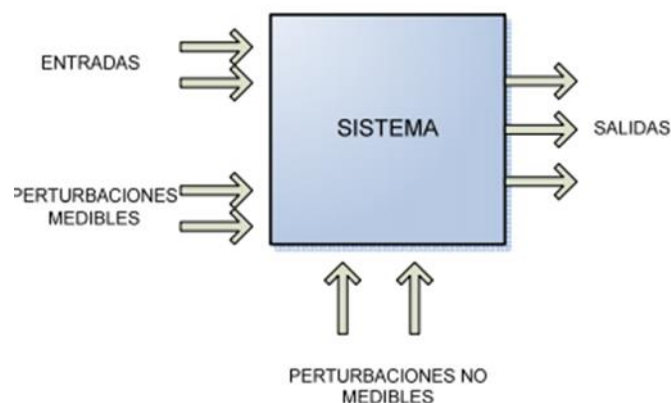
1.6.2.5. Requerimientos generales de un sistema de control.

- **Estabilidad.** Grado de equilibrio que tiene un sistema de control. Con esto, se identifican los límites durante su uso en el periodo de tiempo establecido, o por el reemplazo de alguno de sus componentes al realizar cualquier tipo de mantenimiento.

La respuesta a una señal debe alcanzar y mantener un valor útil durante un periodo de tiempo razonable, para lo cual el sistema debe tener la característica de ser estable, pues un sistema de control inestable podría producir, por ejemplo, oscilaciones persistentes o de gran amplitud en la señal o que esta señal tome valores que corresponden a los límites extremos, por lo que, desde el punto de vista de control, una respuesta inestable es una opción indeseada (véase la Figura 7).

- **Exactitud.** No siempre se requiere una exactitud extrema en aplicaciones de control, por lo que es necesario que exista un error para que el sistema inicie la acción correctora. No hay sistemas de control que sean capaces de mantenerse sin errores, Matemáticamente se puede reducir ese error a casi cero, ya que siempre existirán imperfecciones inherentes a los componentes del sistema. Sin embargo, un sistema de control puede ser exacto dentro de ciertos límites, donde se es capaz de reducir cualquier error a un límite considerable.
- **Rapidez de respuesta.** Para un sistema de control funcione en los lapsos de tiempo correctos debe tener la característica de dar respuestas rápidamente. Esta reacción se debe completar a una señal de entrada en un tiempo aceptable. Es decir, así el sistema sea estable y presente una exactitud, el tiempo de respuesta debe efectuarse de manera rápida³⁰.

Figura 7. Representación de un sistema de control



Fuente: LYCOS. Sistemas de control, Electrónica Básica [en línea]. [citado 25 abril, 2017] Disponible en Internet: <http://usuarios.lycos.es/automatica/temas/tema2/pags/la_lc/lalc.htm>

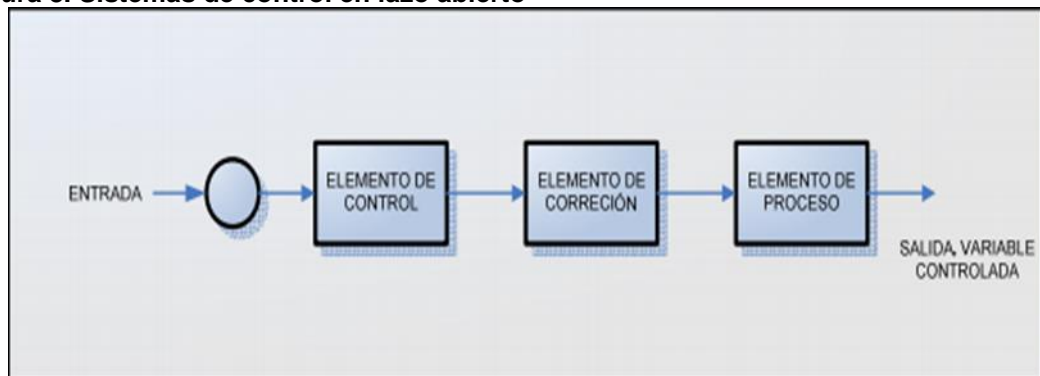
³⁰ MARIO ALBERTO PÉREZ. Op. cit., p. 35

1.6.2.6. Sistema de lazo abierto/cerrado. Cuando un sistema mantiene una relación entre la salida y la entrada de referencia comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado o de lazo cerrado. Existen también sistemas de lazo abierto en los cuales la salida no afecta la acción de control.

1.6.2.7. Sistema en lazo abierto. Este sistema es empleado en la práctica solo si se conoce la relación entre la entrada y la salida, y no se presentan perturbaciones ni internas ni externas como lo muestra la Figura 8. Las características específicas de este sistema son^{31,32}:

- No miden la salida.
- No se retroalimenta para comparar con la entrada.
- A cada entrada de referencia se le asigna una condición operativa fija.
- En el resultado, la precisión del sistema obedece a la condición de calibración.

Figura 8. Sistemas de control en lazo abierto



Fuente: LYCOS. Sistemas de control -lazo abierto- lazo cerrado [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <http://www.academia.edu/7885227/Sistemas_de_control_-_lazo_abierto_-_lazo_cerrado>

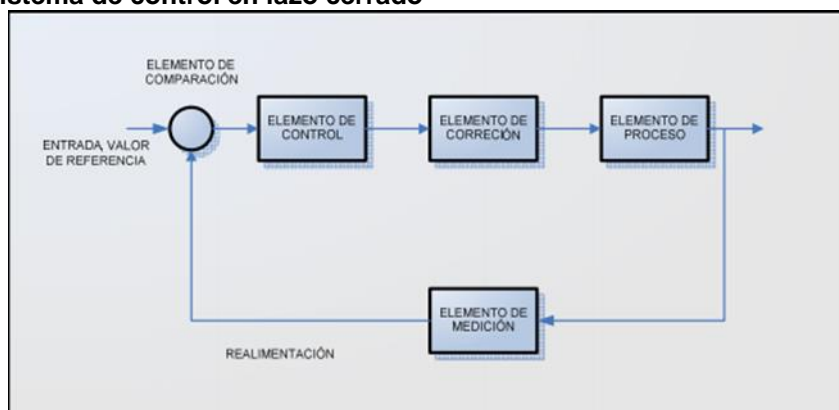
1.6.2.8. Sistema en lazo cerrado. Este sistema involucra el uso de una acción de control de retroalimentación para disminuir el error del sistema. Esa retroalimentación se realiza al controlador de la señal de error de actuación, que es el resultado de la diferencia entre la señal de entrada y la salida, con el fin de reducir el error y permitir que la salida del sistema alcance un valor conveniente (véase la Figura 9)³³.

³¹ LYCOS. Sistemas de control -lazo abierto- lazo cerrado [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.academia.edu/7885227/Sistemas_de_control_-_lazo_abierto_-_lazo_cerrado>

³² *Ibíd.*, p. 3.

³³ LYCOS. *Op. cit.*, p. 37

Figura 9. Sistema de control en lazo cerrado



Fuente: LYCOS. Op. cit., p. 38

1.6.3. Medición de flujo. El fluido se puede definir como el conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por energías cohesivas débiles y las paredes de un recipiente contenedor. Éste tiene la capacidad de circular venciendo las fuerzas de atracción entre las moléculas que son el resultado de una resistencia interna al desplazamiento relativo. Un fluido puede ser^{34,35}:

- Líquido.
- Gaseoso.
- Mezcla de líquido y gas.

El flujo representa la velocidad de la sustancia, para ello se tienen varios sistemas de flujo que son^{36,37}:

- Tubería cerrada.
- Semicerrados.
- Abiertos.

1.6.3.1. Fluidos ideales. Los flujos a alta velocidad en los gases se pueden asociar con grandes variaciones de presión, temperatura y densidad, pero estas variaciones son pequeñas en flujos a baja velocidad, los cuales pueden ser estudiados como fluidos incompresibles ideales. Los fluidos se clasifican en³⁸:

- Compresibles.

³⁴ REDULA. Medición de flujo de fluidos. [en línea]. [citado 25 abril, 2017]

Disponible en Internet:

<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosDictados/web%20instrumentacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/libro%20pdf/CAP%204%20Medicion_flujo_2009.pdf>

³⁵ *Ibíd.*, p.175.

³⁶ *Ibíd.*, p.176.

³⁷ *Ibíd.*, p.176.

³⁸ *Ibíd.*, p.176.

- Incompresibles: en estos se asume la densidad constante o con pequeñas variaciones en cuanto a presión y temperatura³⁹.

1.6.3.2. Fluidos reales. Debido a la fricción que se genera por la viscosidad, se presenta una disipación de energía, los fluidos con estas características son los denominados fluidos reales. La viscosidad se considera como una propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos. Por ello, se afirma que según la viscosidad que presente el fluido, éste se puede clasificar en⁴⁰:

- Fluidos newtonianos: son los que tienen viscosidad constante en un rango de temperatura aceptable. Por ejemplo: el agua, el aceite.
- Fluidos no newtonianos: son los que tienen viscosidad en función del esfuerzo cortante, la temperatura y la presión. Por ejemplo: la pintura, la sangre.⁴¹

1.6.4. Modelo de tanques acoplados. Para formar un sistema de tanques acoplados, es necesario juntar dos (2) tanques. A partir de esta afirmación surge el siguiente cuestionamiento:

¿Cuál es el objetivo del control con los tanques acoplados? Para ello se tiene que, en los depósitos acoplados, los estados del sistema son el nivel (H_1) en el tanque 1 y el nivel (H_2) en el tanque 2. Por eso si la entrada de control es la velocidad de flujo de la bomba (Q_i) y (Q_b) es el flujo que sale a través de la válvula, entonces quiere decir que la variable para ser controlada sería normalmente el segundo estado, el nivel (H_2), con disturbios causados por variaciones en el índice de flujo del sistema por la válvula (B) o por cambios en la válvula (C). Es así que se vuelve necesario construir un modelo para cada uno de los niveles del tanque.

Para el tanque 1, la ecuación 1 define el equilibrio de flujo:

$$Q_i - Q_b = A \frac{dH_1}{dt} \quad (1)$$

Donde la nueva variable es el índice de flujo (Q_b) del fluido del tanque 1 al tanque 2 a través de la válvula (B).

Para el tanque 2, el equilibrio de flujo se describe por la ecuación 2:

$$Q_b - Q_c = A \frac{dH_2}{dt} \quad (2)$$

La nueva variable es el índice del flujo (Q_c) del fluido del tanque 2 a través de la válvula (C).

³⁹ Ibid., p.176.

⁴⁰ Ibid., p.178.

⁴¹ Ibid., p.178.

Un modelo del sistema surge de las dos ecuaciones de flujo y de la ecuación no lineal para el flujo a través de las válvulas. Para ello, si las válvulas son orificios ideales, el sistema no lineal es de nuevo regida por una raíz cuadrada. Entonces las dos ecuaciones (3 y 4 respectivamente) de flujo para válvulas ideales son:

$$Q_i - C_{db}a_b\sqrt{2g(H_1 - H_2)} = A \frac{dH_1}{dt} \quad (3)$$

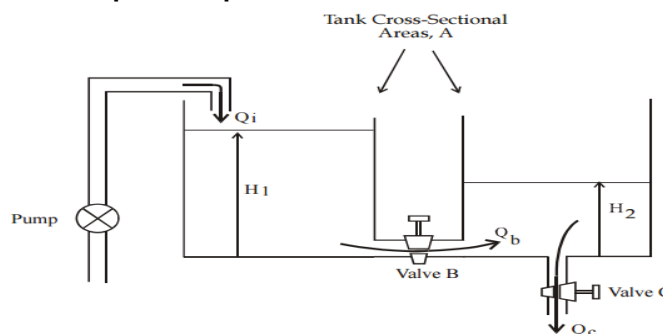
$$C_{db}a_b\sqrt{2g(H_1 - H_2)} - C_{dc}a_c\sqrt{2g(H_2)} = A \frac{dH_2}{dt} \quad (4)$$

En donde, C_{db} es llamado el coeficiente de descarga de la válvula y g es la constante gravitacional, equivalente a **980 cm/sec²**. En este caso, la variable a , representa el área transversal del orificio dada por las dimensiones de cada válvula en el proceso.

En la ecuación 3 se describen los sistemas dinámicos de depósitos acoplados en su forma no lineal con ecuaciones ideales para las válvulas. En aplicaciones generales, se dice que la ley de la raíz cuadrada es solamente una aproximación. Entonces, para diseñar los sistemas de control para los tanques acoplados, las ecuaciones 3 y 4 respectivamente son linealizadas mediante variaciones pequeñas Q_i en Q_i , h_1 en H_1 y h_2 en H_2 .⁴²

Para poder diseñar un modelo de tanques acoplados, es importante contar con los conceptos necesarios sobre el funcionamiento básico de las esclusas, debido a que es la fundamentación de la visita técnica al canal de Panamá. Por ende, se mostrarán definiciones concretas para dar el relacionamiento necesario y la posible aplicabilidad de estrategias de control empleadas en un sistema de esclusas, a un sistema didáctico de tanques acoplados (véase la Figura 10).

Figura 10. Sistema de Tanques Acoplados



Fuente: CONTROL SYSTEMS PRINCIPLES. Sistemas de Depósitos Acoplados [en línea]. [citado 25 abril, 2017] Disponible en Internet: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/03CoupledTanksSP.pdf>>

⁴² CONTROL SYSTEMS PRINCIPLES. Sistemas de Depósitos Acoplados [en línea]. [citado 25 abril, 2017] Disponible en Internet: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/03CoupledTanksSP.pdf>>

1.6.5. Flujo laminar. El flujo laminar presenta la característica de tener un movimiento de fluido ordenado, estratificado y suave. En este tipo de flujo, el fluido presenta una tendencia en láminas paralelas sin entremezclarse donde cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, que se denomina Línea de Corriente. El mecanismo de transporte lateral empleado en este tipo de flujo es únicamente molecular.

Los fluidos que se mueven a velocidades bajas o que presentan viscosidades altas son claros ejemplos de fluidos con flujo laminar, mientras que si el fluido se desplaza a alta velocidad o posee viscosidad baja se considera como turbulento. Un parámetro adimensional importante en las ecuaciones que describen las condiciones al flujo es el Número de Reynolds.

Cuando el fluido se desplaza en un tubo de sección circular, el flujo persistente será laminar por debajo de un número de Reynolds crítico de aproximadamente 2040,1. Sin embargo, el número de Reynolds que delimita flujo turbulento y laminar depende de la geometría del sistema y además la transición de flujo laminar a turbulento es en general sensible a ruido e imperfecciones en el sistema.⁴³

1.6.5.1. Numero de Reynolds. Puede utilizarse para modelar las características que toma el flujo dentro de la tubería por su característica adimensional, además otorga una indicación de la pérdida de energía ocasionada por efectos viscosos que pueden llegar a producirse. La ecuación 5 describe el flujo que recorre el interior de una tubería y las condiciones que determinan si el flujo es laminar^{44,45}:

$$Re = \frac{PVsD}{u} \quad (5)$$

Sí $Re < 2000$ el flujo será laminar.

P= Densidad de fluido.

Vs= Velocidad característica del fluido.

D= Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido.

u= viscosidad dinámica del fluido.

1.6.6. Flujo turbulento. El flujo turbulento se presenta cuando el caudal del fluido se da en forma brusca y caótica, además, sus partículas se encuentran en forma desordenada y en su trayectoria surgen remolinos pequeños los cuales dependen del área de movimiento. Para este tipo de fluido es muy difícil determinar su curso o su trayectoria futuro ya que

⁴³ REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. Proc. R. Soc. London. 1883. 35: 84-99.

⁴⁴ TANSLEY, Claire E.; MARSHALL, David P. Flow past a Cylinder on a Plane, with Application to Gulf Stream Separation and the Antarctic Circumpolar Current. Journal of Physical Oceanography. 2001

⁴⁵ Ibíd., p. 10.

su forma no es determinada⁴⁶.

1.7. MARCO CONCEPTUAL

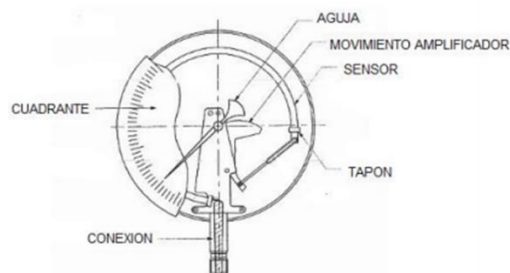
1.7.1. **Sensores de presión.** Según su campo de aplicación y clasificación estos se pueden clasificar según tres características:

- Mecánicos
- Neumáticos
- Electromecánicos

1.7.1.1. Sensores mecánicos

- **Sensor en tubo Bourdon.** Tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo y cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por medio de un sistema de piñón y cremallera (véase la Figura 11).

Figura 11. Sección interna tubo Bourdon

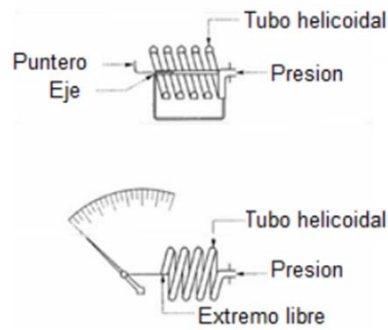


Fuente: SITES.GOOGLE.COM. (2017). Medición de Presión - Instrumentación Industrial UNEXPO 2009-I. [en línea]. [citado 24 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://sites.google.com/site/instindunexpo2009i/primerasignacion/marquezcampos-tomazzolli-espinoza/medicion-de-presion>>

El elemento en espiral se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando más de una espira en forma de hélice. Estos elementos son ideales como registradores (véase la Figura 12).

⁴⁶ CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Hidráulica de los canales abiertos. Applied Hydrology, McGraw-Hill International editions. 1988

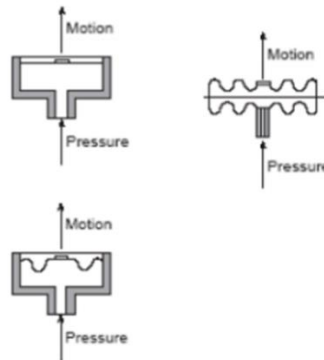
Figura 12. Funcionamiento espiral de presión para indicación



Fuente: SITES.GOOGLE.COM. (2017). Op. cit., p.40.

- **Sensor con diafragma.** En éstos, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis. Utilizado para pequeñas presiones (véase la Figura 13).

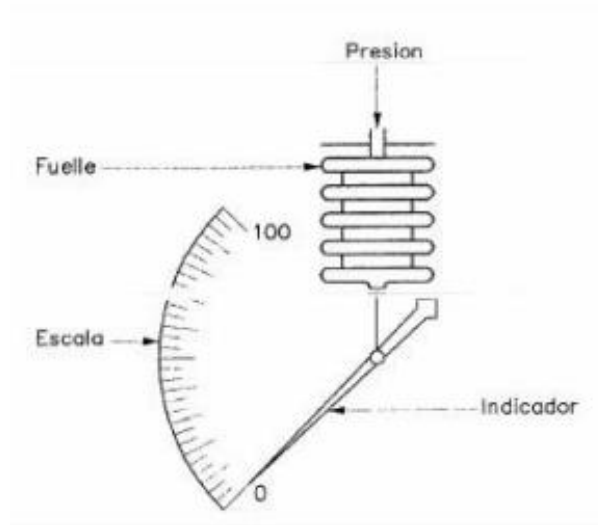
Figura 13. Sección interna funcionamiento sensor de diafragma



Fuente: SAPIENSMAN.COM. (2017). Instrumentación industrial. Medición de la presión. [en línea]. [citado 24 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc57.php>>

- **Sensor de fuelle.** Parecido al anterior, solo que está conformado por una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable. Utilizado para pequeñas presiones (véase la Figura 14).

Figura 14. Funcionamiento sensor de fuelle



Fuente: BLOGINSTRUMENTACION.COM. (2017). ¿Cómo se mide la presión diferencial? [en línea]. [citado 24 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2010/12/20/como-se-mide-la-presion-diferencial/>>

1.7.1.2. Sensores neumáticos

- **Sensor en sistema tipo Paleta o Tobera.** Una tobera es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido (en forma térmica y de presión) en energía cinética. Como tal, es utilizado en turbo máquinas y otras máquinas, como eyectores, en que se pretende acelerar un fluido para la aplicación de que se trate. El aumento de velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por una disminución de su presión y temperatura, al conservarse la energía (véase la Figura 15). Las variables dentro del sensor neumático son:

P_s = Aire de alimentación.

R = Restricción para filtrar el aire de alimentación.

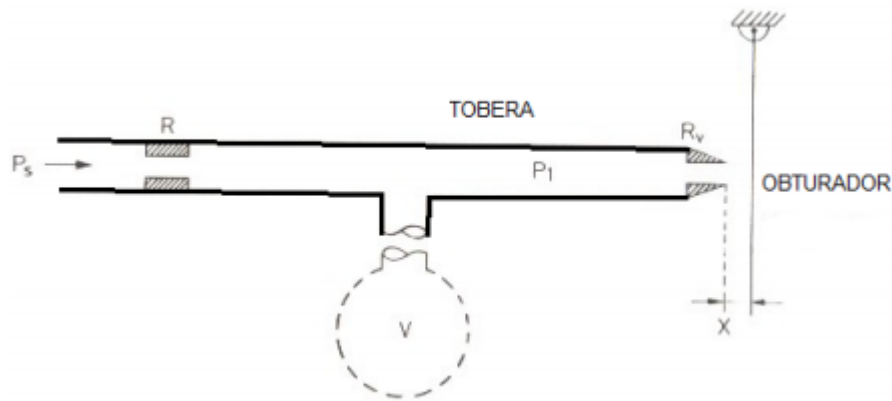
P_1 = Presión dentro de la tobera.

R_v = Salida al obturador.

V = Volumen a llenar.

X = Fuerza ejercida por la tobera al obturador.

Figura 15. Funcionamiento sensor neumático

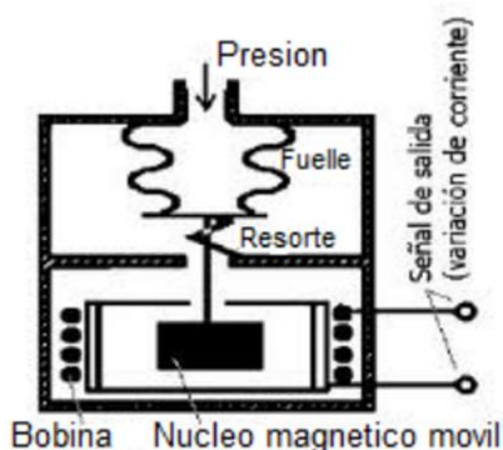


Fuente: SEMANA-TEMATICA.WIKISPACES.COM. (2017). semana-temática - sensor presión neumáticos. [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://semana-tematica.wikispaces.com/sensor+presion+neumaticos>>

1.7.1.3. Sensores electromecánicos. Consisten en la suma de dos elementos, en el cual uno es el elemento mecánico elástico y el siguiente sería un transductor eléctrico que puede ser resistivo, inductivo, de reluctancia variable o capacitivo.

- **Sensores de inductancia variable.** El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina. Esto hace aumentar la tensión inducida en el bobinado (véase la Figura 16).

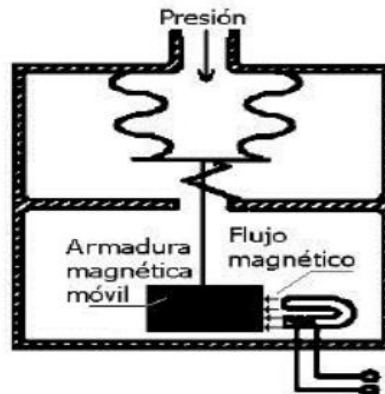
Figura 16. Sensores de inductancia variable



Fuente: VARGAS (2017). Sensores de Presión. [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Es.slideshare.net. Disponible en Internet: <<https://es.slideshare.net/ingmanttovargas/sensores-de-presin-53656067>>

- **Sensor de reluctancia variable.** Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante, con la cual, al cambiar la posición de la armadura, varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil (véase la Figura 17).

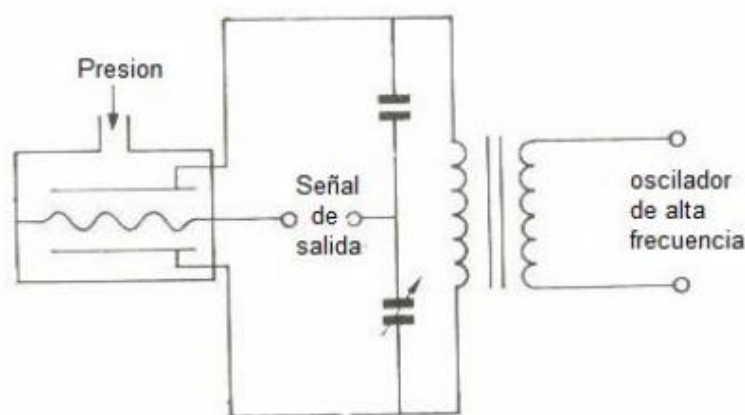
Figura 17. Sensores de reluctancia variable



Fuente: VARGAS (2017). Op. cit., p. 18

- **Sensores Capacitivos.** Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. Consiste en dos condensadores, uno de capacidad fija (de referencia) y el otro de capacidad variable, el cual da la medida (véase la Figura 18).

Figura 18. Sensor capacitivo



Fuente: RAMOS (2017). Sensores de presión capacitivos. Es.slideshare.net. [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://es.slideshare.net/LehontiRamos/sensores-de-presin-capacitivos>>

- **Sensores resistivos.** El principio de medida con sensores resistivos se basa en la medida de la variación de la resistencia inducida por la deformación en función de la presión. La resistencia de un conductor eléctrico está definida por la ecuación 6:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6)$$

Dónde:

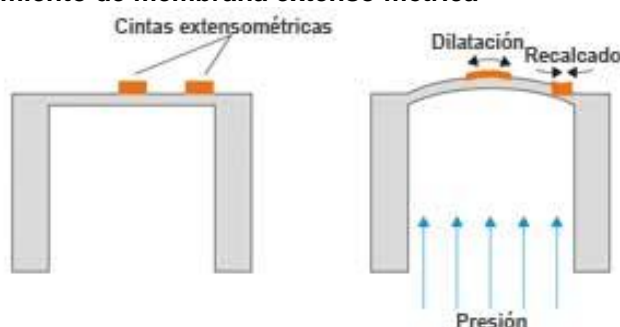
- R = Resistencia eléctrica (ohmios).
- ρ = Resistencia específica (ohmios).
- l = Longitud (m).
- A = Área o superficie de la sección (m^2).

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento de la resistencia eléctrica, ya que la resistencia específica se mantiene constante. Una deformación provocada por recalado tendría el efecto contrario.

Para la realización del principio se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada al someterlo a presión. A menudo este cuerpo consiste en una membrana con una parte fina. El valor de la deformación en función de la presión se mide mediante una cinta extensométrica.⁴⁷

Habitualmente se encuentran cuatro cintas extensométricas en una membrana, de las cuales, unas están ubicadas en el área de dilatación y otras en el área del recalado. La deformación de la membrana provoca la deformación de las cintas con el efecto de un aumento proporcional de la resistencia (por dilatación) o de una reducción (por recalado) (véase la Figura 19). Para realizar una medición precisa se conecta las cintas a un puente de Wheatstone⁴⁸.

Figura 19. Funcionamiento de membrana extenso métrica



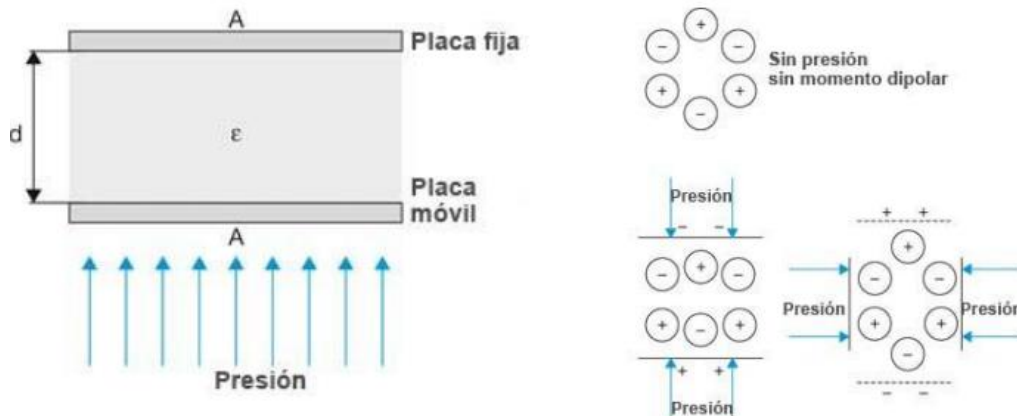
Fuente: BLOGINSTRUMENTACION.COM. (2017). ¿Cómo funciona un transmisor de presión? [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2017/02/15/como-funciona-un-transmisor-de-presion/>>

⁴⁷ BLOGINSTRUMENTACION.COM. (2017). ¿Cómo funciona un transmisor de presión? [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2017/02/15/como-funciona-un-transmisor-de-presion/>>

⁴⁸ Ibíd., p. 4.

- **Sensores piezoresistivos.** El principio de la medida con sensores piezoresistivos es similar al de los sensores resistivos. La diferencia reside en la utilización de semiconductores como cintas extensométricas en vez de metal y la deformación provoca en este caso una variación de la resistencia específica por efectos de su orientación atómica. Según la ecuación 6, la resistencia eléctrica varía proporcional con la resistencia específica. El funcionamiento teórico en este tipo de elementos se puede evidenciar en la Figura 20.

Figura 20. Funcionamiento teórico en elementos piezoresistivos



Fuente: SLIDESHARE.NET. (2017). Control pid. [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://es.slideshare.net/rodolfoqg1/control-pid-55322800>>

Las cintas metálicas pueden colocarse en cualquier material, mientras que las cintas semiconductoras están incorporadas como microestructura en la membrana, la cual puede ser de silicio. La Figura 20 además, evidencia el efecto de la presión en el material tanto de la placa fija como de la placa móvil⁴⁹.

Dado que las microestructuras no presentan la suficiente resistencia contra numerosos medios de proceso, el chip se encapsula para la mayoría de las aplicaciones. La transmisión de la presión se efectúa en este caso de manera indirecta, por ejemplo, mediante una membrana metálica o mediante aceite como medio de transmisión⁵⁰.

El gran volumen del efecto piezoresistivo permite la aplicación de estos sensores también para presiones muy bajas. Sin embargo, la elevada sensibilidad a efectos de temperatura requiere una compensación de temperatura individual para cada sensor⁵¹.

⁴⁹ *Ibíd.*, p. 15

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 16

⁵¹ *Ibíd.*, p. 20

1.8. VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL

1.8.1. Sistema de esclusas canal de Panamá. La evolución diaria, cambia la tecnología, la forma de comunicarse, la forma de hacer negocios y las organizaciones deben adaptarse a la nueva realidad. Por eso, surge el gran reto de ampliar el Canal, no solo para aumentar su capacidad en términos de tunelaje, sino añadiendo a la oferta de servicios existente, un nuevo producto: Poder atender buques muchos más grandes en sintonía con la tendencia mundial.

Esa decisión de ampliar el Canal, también representa una oportunidad para aumentar la cartera de servicios complementarios, maximizando el uso de su patrimonio y añadiendo mayor valor a la ruta de Panamá. Con esto se pretende contribuir de forma sostenible a la prosperidad de Panamá, a través de un valioso equipo humano conectando la producción con lo mercados globales para aportar valor a los clientes.

Se destaca el principal recurso, que es el humano porque gracias a su compromiso y la calidad profesional y productividad, el canal es hoy una referencia mundial. Además, se resalta la sostenibilidad porque se cree que, a través del equilibrio ambiental, económico y social, se asegura un buen futuro para todos.

Los tres juegos de esclusas de dos líneas operan como un elevador de agua que levanta los buques al nivel del lago Gatún, 8.9 metros (27 pies) sobre el nivel del mar. Luego los baja nuevamente al nivel del mar en el otro extremo del Istmo de Panamá. Las dimensiones de las cámaras de las Esclusas son: 33.5 metros (110 pies) de ancho, 305 metros (1000 pies) de largo, y 12.5 metros (41 pies) de profundidad (véase la Figura 21).

Figura 21. Cámaras de las Esclusas del Canal de Agua Clara



Fuente: Autores

1.8.1.1. Arribo y Fondeo de buques. Las áreas de fondeo se designan según las características del buque, carga y orden de tránsito. Ninguna persona podrá abordar un buque fondeado, a excepción del personal autorizado por la Autoridad del Canal de Panamá. Todo buque que llega o va a transitar, debe entregar copia de la documentación solicitada y estará sujeto a las órdenes y a la supervisión del Control de Tráfico de la Autoridad del Canal.

1.8.1.2. Navegación. Para ejercer control sobre el tráfico marino, se deben cumplir los siguientes pasos:

- Prepara el itinerario (tránsito y amarres).
- Interactúa con los centros de control de Esclusas.
- Solicita cuadrillas y personal extraordinario.
- Asigna los prácticos.
- Administra el sistema de reservación de Tránsito.
- Controla el soporte de lanchas y remolcadores.
- Es el centro primario de control de emergencias.

Además, los recursos necesarios para cumplir las tareas de control sobre la navegación son:

- Agua.
- Remolcadores.
- Pasacables.
- Transporte terrestre y acuático.

También se debe tener en cuenta que la navegación y control del tráfico marino dependen de la capacidad del Canal y el funcionamiento en general de cada uno de sus componentes:

- La capacidad del Canal no es una constante.
- Es una función de los arribos diarios y la mezcla de buques:
 - ✓ Dimensiones.
 - ✓ Tipos de Buques.
 - ✓ Carga.
 - ✓ Calado.
 - ✓ Aspectos Estructurales (por ejemplo: que afectan la visibilidad).
 - ✓ Otros.

Inciden también la capacidad instalada, los recursos y otros factores externos (luz del día, factores meteorológicos, etc.).

1.8.2. Maquinaria principal del Canal de Panamá. Las Figuras 22 y 23 respectivamente, muestran la sección típica de las esclusas y la maquinaria que opera allí:

- Cámara vaciada con una alcantarilla.
- Cámara llenada por dos alcantarillas.
- Alcantarillas principales.
- Alcantarillas laterales.
- Agujeros de entrada y salida de las aguas.
- Válvulas cilíndricas.
- Compuertas.
- Válvulas de Vástago.

Figura 22. Maquinaria



Fuente: Autores

Figura 23. Composición típica de las esclusas



Fuente: Autores

Se aplica el principio de gravedad de un cuerpo de agua más alto a uno más bajo, esas compuertas que se mueven verticalmente fueron manejadas originalmente por maquinaria electromecánica de engranajes y actualmente, por un sistema hidráulico. El agua sale, por las alcantarillas laterales y hay cinco orificios para cada una. A lo largo del Canal hay veinte alcantarillas laterales, pero, además, existen otros orificios adicionales para que en total se tengan hasta ciento cinco.

Su función es llenar o irrigar agua desde abajo, para que a medida que el barco vaya subiendo, el agua vaya empujando. Las alcantarillas laterales tanto en el Este como en el Oeste se dedican a cada cámara que tienen asignada. Pero en la alcantarilla del centro, se puede verter agua hacia las laterales, cerrando los accesos inferiores mediante válvulas cilíndricas y dependiendo de la dirección a la que se quiera llevar el agua.

Las válvulas cilíndricas no son necesarias en el Canal ampliado porque solamente es una vía y tiene dos alcantarillas de cada lado, por ende, no hay necesidad de compartir ni de tener alcantarilla central. Las esclusas tradicionales, tiene dos carriles entonces, en el nivel central tienen que compartirse.

Todo el proceso tarda aproximadamente 45 minutos. Para la detección de presencia de embarcaciones se utilizan sensores de láser. Los niveles de agua se transmiten a través de una señal de microondas que se dispara por medio de sensores de radar. Estas microondas varían su frecuencia debido al eco generado, teniendo como resultados dos niveles de frecuencia diferentes que se restan para obtener el tiempo que ha tomado la onda en llegar al agua y de esta manera calcular la distancia.

1.8.2.1. Instalaciones Electromecánicas. Estas instalaciones incluyen:

- Sistema de válvulas para el funcionamiento hidráulico del Canal que se distribuyen en setenta (70) principales a cada lado, con rejas y elementos asociados.
- Ocho (8) Compuertas correderas a cada lado del Canal.
- Sistemas electrónicos de instrumentación y control automático.
- Demás sistemas asociados, entre ellos: anti-incendios, bolardos, iluminación, seguridad e infraestructura de apoyo.

El sistema funciona por gravedad; el motor principal que sube y baja los buques en las esclusas es la lluvia acumulada en los lagos situados a un nivel superior. Los elementos claves en las instalaciones corresponden a:

- Fiabilidad, seguridad y redundancia necesaria.
- Tiempos de operación de acuerdo a los requerimientos de la Autoridad del Canal de Panamá.

- Reducción en el consumo de agua para cada sistema de esclusado.
- Facilidad en su mantenimiento.

1.8.2.2. Componentes electromecánicos

- **Compuertas.** Las 16 compuertas son el suministro eléctrico mecánico más importante y de mayores implicaciones presupuestales. Estas compuertas son del estilo tradicional y se encuentran ubicadas en las esclusas de Miraflores (véase la Figura 24). Por su tamaño y peso requieren un cuidado especial en el método de montaje.

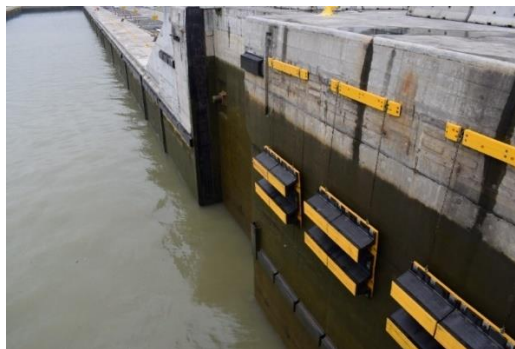
Figura 24. Compuerta tradicional



Fuente: Autores

- **Compuertas Rodantes.** Estas compuertas son diferentes a las tradicionales, se encuentran ubicadas en las inmediaciones al nuevo modelo de esclusas de Agua Clara y Cocolí. Las compuertas están hechas de láminas de acero con el interior hueco revertido de barras y láminas del mismo material como lo evidencia la Figura 25. Existen dos compuertas entre cámara que se despliegan de manera paralela para dar paso a los buques una vez las cámaras se hayan llenado o vaciado.

Figura 25. Compuertas rodantes



Fuente: Autores.

El sistema de rodaje se activa desde una caseta de control. Dos cables colocados en la parte superior de ambos lados de las compuertas y un carro de rodaje en la parte inferior delantera son los encargados de darle el movimiento de abrir y cerrar (véase la Tabla 1).

Tabla 1. Medidas de las compuertas de Agua Clara y Cocolí

Esclusas	Cantidad compuertas	Largo/Ancho/Alto (metros)	Peso (ton)
Agua Clara	2	57.60 x 8 x 22.30	2000
	4	57.60 x 10 x 30.19	3100
	2	57.60 x 10 x 29.07	2600
Cocolí	2	57.60 x 8 x 22.30	2100
	4	57.60 x 10 x 30.92	3700
	2	57.60 x 10 x 33.04	3300

Fuente: Autores.

- **Componentes principales de las compuertas rodantes.** Las compuertas rodantes están constituidas por un Sistema de Tracción de las Compuertas, conformadas por:
 - Molinete.
 - Ensamblaje de Soporte de poleas.
 - Soporte del cable.
 - Sistema de tensión.

En la parte externa de las compuertas, se puede evidenciar una estructura compuesta principalmente por concreto, el mecanismo de tracción y los rieles superior e inferior (véase la Figura 26).

Figura 26. Componentes compuertas rodantes



Fuente: Autores.

Como se puede observar en la tabla 2, la maquinaria de las nuevas esclusas tiene varios componentes que se pueden agrupar:

Tabla 2. Maquinaria y sus cantidades

MAQUINARIA	CANTIDAD
Compuertas Rodantes	8
Válvulas de Conductos	36
Válvulas de Alcantarilla	32
Válvulas de Ecuación	8

Fuente: Autores.

Estos componentes se encuentran distribuidos a través de las 3 cámaras dispuestas para el nuevo juego de esclusas: Cámara Alta, Media y Baja (véase la Figura 27).

Figura 27. Cámaras para el nuevo juego de esclusas



Fuente: Autores.

- **Válvulas.** Las válvulas de alcantarilla son de mayores dimensiones del complejo de esclusas con más de 7 metros de largo. Se encargan de regular el flujo de desagüe entre las cámaras, la alcantarillas y las tinas de reutilización. Las dimensiones se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. Dimensiones válvulas de alcantarilla

Dimensiones	
Largo (metros)	7.12
Ancho (metros)	5.18
Alto (metros)	0.68
Peso (toneladas)	30.8

Fuente: Autores.

Las válvulas de ecualización se encargan de controlar el paso del agua entre las cámaras de la esclusa. Las dimensiones se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Dimensiones válvulas de ecualización

Dimensiones	
Largo (metros)	4.58
Ancho (metros)	4.05
Alto (metros)	0.64
Peso (toneladas)	11.91

Fuente: Autores.

Las válvulas de conductos se encargan de controlar el paso del agua entre las tinas y las cámaras de la esclusa. Las dimensiones se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Dimensiones válvulas de conducto

Dimensiones	
Largo (metros)	6.60
Ancho (metros)	5.40
Alto (metros)	0.67
Peso (toneladas)	24.01

Fuente: Autores.

- **Locomotoras.** Existe allí un engranaje que va subiendo sobre la cremallera y que le da la fuerza para subir 55 toneladas de peso en las esclusas (véase la Figura 28).

Figura 28. Locomotoras



Fuente: Autores.

- **Rieles conductores.** Se encargan de dar soporte y tracción necesarios para darles servicio a las locomotoras en su tránsito por las esclusas (véase la Figura 29).

Figura 29. Rieles conductores



Fuente: Autores

1.8.3. Sistema de distribución eléctrica

1.8.3.1. Distribución de media tensión. Las esclusas poseen una red en 12 kV compuesta de dos lazos (norte y sur). Se encuentran provistas de 16 switchgears y 16 transformadores, los cuales se encargan de bajar el voltaje de 12 kV a 480 V. El sistema de protección de fuego o “Fire Protection System” requiere de 4160 V para su alimentación.

1.8.3.2. Distribución de Baja Tensión. Presenta las siguientes características:

- Mecanismos de Tracción de Compuertas.
- Motores de HPU, transformadores.
- A/C, ventiladores, elevadores, grúas puente, puertas enrollables.
- Cobrestantes, bloqueadores de camino, monitores de protección de incendio.
- Iluminación, bombas de sumidero, soldadura y elevadores.
- Alimentación de edificios (CB, SS, MB, Personal, PBR, Caseta de seguridad, FER).

La Figura 30 muestra el tablero de control de distribución eléctrica que tiene el operario a disposición en el Centro de Control.

Figura 30. Sistema de distribución



Fuente: Autores.

1.8.3.3. Generador de respaldo. El sistema cuenta con un generador conectado al “switchgear” de 12 kV, el cual está integrado al sistema de control de distribución eléctrica. La capacidad del generador es de 2.5 MW y el Voltaje de Salida es de 12000 V a 60 Hz (véase la Figura 31).

Figura 31. Generador de respaldo



Fuente: Autores

1.8.4. Sistema Hidráulico

1.8.4.1. Unidad de Potencia Hidráulica. Cada sistema de accionamiento hidráulico consiste de un cilindro hidráulico, líneas de tubería con gabinetes eléctrico/electrónicos de control local (véase la Figura 32). Dicho accionamiento se logra gracias a los tipos de motores mencionados en la Tabla 6:

Tabla 6. Tipos de motores HPU

Tipos de motores	Capacidad (HP)
Válvulas de alcantarilla	100
Válvulas de conducto	75
Válvulas de ecualización	50

Fuente: Autores.

Figura 32. Unidad de potencia hidráulica



Fuente: Autores.

1.8.4.2. Estación de diagnóstico de HPUS (Hidraulic Power Unit). La Figura 33 muestra la pantalla encargada de indicar el estado de las unidades de potencia hidráulica y sus datos relacionados. La terminal local permite que el personal de mantenimiento verifique el estado del equipo almacenado en los gabinetes sin necesidad de abrirlo o verificarlo directamente. Se encuentra ubicado en un Gabinete de Control independiente.

Figura 33. HPU status



Fuente: Autores.

- 1.8.4.3. Tinas de reutilización de agua.** Cada una de las cámaras de las nuevas esclusas, tendrá tres tinas de reutilización de agua (véase la Figura 34). Su propósito principal es utilizar nuevamente el 60 por ciento del agua en cada tránsito. En total, serán 9 tinas para cada uno de los dos complejos de esclusas y un total de 18 tinas para todo el proyecto. Cada tina tiene las siguientes medidas: 70 metros de ancho por 5.50 metros de profundidad.

Las nuevas esclusas tendrán 427 metros (1.400 pies) de largo por 55 metros (180 pies) de ancho y 18.3 metros (60 pies) de profundidad.

Figura 34. Tinas de reutilización de agua



Fuente: Autores.

- **Conservación de Agua.** Cuando el Centro de Control Marítimo (MTC) hace su programación diaria, siempre toma en consideración la conservación de agua. Estas tinas ahorran el 60% del agua requerida en cada esclusaje. El consumo de agua es de 7% menos en comparación con el sistema de esclusas original. El tiempo de tránsito en cada complejo

de esclusas se encuentra entre 2 y 2.5 horas, dependiendo de la operación de las tinas de reutilización.

1.8.5. Tránsito y funcionamiento general. En la Tabla 7, se muestran las restricciones de los buques, las etiquetas que tiene cada una de ellas y su respectiva descripción. Con esto, los operarios pueden identificar el estado actual del tránsito diario de cada uno de los buques que emplean el Canal de Panamá.

Tabla 7. Restricciones de los Buques

Restricciones de los Buques		
Siglas	Significado	Descripción
CCDL	Clear Cut, Daylight	Tránsito diurno de esclusa a esclusa. Una vía en el corte.
DLCC	Daylight in the Cut, Clear Cut	Tránsito diurno por el corte. Una vía en el corte.
FDCC	Full Daylight, Clear Cut	Tránsito diurno de BY1P a BY1A- Una vía por el corte.
CC	ClearCut	Una vía por el corte.
CCN	Clear Cut at Night	Una vía por el corte sólo durante horas nocturnas.
17D	170 Daylight	Tránsito diurno y manga combinada menor de 170° (HML-C; HML-Y; HML-D)
DLC	Daylight un the Cut	Tránsito diurno por el Corte.
DCL	Daylight in the Cut and at the Locks	Tránsito diurno por el corte y por las esclusas.

Fuente: Autores.

Cada complejo de esclusas tendrá tres niveles. La configuración será muy similar a las Esclusas de Gatún ya existentes. El proyecto creará un nuevo carril con una esclusa a cada lado, proporcionando una capacidad para manejar embarcaciones de hasta 49 metros (160 pies) de ancho, 366 metros (1200 pies) de largo y 15 metros (50 pies) de profundidad, o con un volumen de carga de hasta 170000 toneladas de peso muerto y 12000 TEU (Unidad Equivalente a Veinte Pies).

Los principios de funcionamiento se constituyen básicamente por:

- Modos de Operación (Relevos, carrusel, ahorro de agua).
- Desempeño (tiempos y ciclos de esclusaje).
- Maquinarias y Control (Hidráulica y Controles).
- Descripción del Programa de Mantenimiento (periódico, preventivo y correctivo y el proceso de RMC).

1.8.6. Tipos de esclusaje

- 1.8.6.1. Esclusaje de Línea de Mano.** Las embarcaciones pequeñas de 125 pies hacia abajo, no usan locomotoras y hacen sus esclusajes con líneas de amarre aseguradas al muro a mano (véase la Figura 35).

Figura 35. Esclusaje línea de mano



Fuente: Autores.

- 1.8.6.2. Esclusaje Regular.** Tránsito de Buques desde 125 pies hasta 965 pies. Utilizan de 4 a 8 locomotoras según sus dimensiones (véase la Figura 36).

Figura 36. Esclusaje Regular



Fuente: Autores.

- 1.8.6.3. Esclusaje de Relevó.** Con el fin de incrementar la capacidad de esclusajes, se efectúan operaciones de Relevó en las Esclusas de Miraflores y Gatún (véase la Figura 37). Para tal fin, dos grupos de locomotoras son utilizadas en la misma línea. Adicionalmente, en Gatún el intercambio de locomotoras se hace en la cámara intermedia y en Miraflores se hace en la primera cámara por donde

ha entrado el buque. Con esta operación, por cada 3 buques se logra el tránsito de uno más.

Figura 37. Esclusaje de Relevo



Fuente: Autores.

1.8.6.4. Esclusaje en Tándem. Tienen dos variables en la manera como se ahorra el agua dependiendo de los tamaños de los buques (Eslora total no mayor a 825 pies). Pueden ser: Dos buques pequeños o un buque grande y uno pequeño (véase la Figura 38).

Figura 38. Esclusaje en Tándem



Fuente: Autores.

- **Ciclos de Esclusaje.** Se definen como el tiempo en que las Esclusas están listas para atender al siguiente Buque (Panamax). En los casos de Miraflores y Gatún, los tiempos más se logran con el sistema de relevo con un tiempo de 45 minutos. Para el caso de Pedro Miguel, el tiempo es de 1 hora. Se estima que el método de carrusel puede optimizar eficientemente estos tiempos.
- **Proceso de Amarre.** Se utiliza un barco pequeño de remos que amarra la línea mensajera del hierro que es arrojada a la línea mensajera del barco. Luego, se amarran ambas líneas permitiendo que los cables de la locomotora se amarren con la línea mensajera del cable de la locomotora,

el cuál es arrojado al agua. El molinete ubicado en la parte superior del barco, hala la línea mensajera y va levantando el cable de la locomotora, quedado el cable de acero abordo, se ubica dentro del barco y ahora la locomotora empieza a tensar el cable.

1.8.7. Sistema de Control de Maquinaria de Esclusas (SiCME).

Un Sistema de Control de Procesos consiste en un conjunto de sensores, procesadores, computadoras, pantallas y consolas de operadores integrados a través de redes de comunicación y programas para controlar procesos. El proceso crítico en las esclusas es el “llenado y vaciado” de las recámaras y tinas de reutilización de agua, el cual se logra con la acción del sistema de compuertas y válvulas. Para accionar y monitorizar compuertas y válvulas de manera ordenada y sincronizada se instalará un Sistema de Control de Maquinaria de Esclusas con programas desarrollados para cada pieza de maquinaria: este controla todos los componentes que abren y cierran el paso de agua y supervisan la entrada y salida de buques en las cámaras. El sistema distribuye órdenes de acción, transmite señales de diagnóstico y verificación, toma decisiones con base a ellos e incluye las decisiones de los operadores.⁵²

Según Miroslava Herrera⁵³, Los subsistemas esenciales para la operación de las esclusas son los Sistemas de Control de Distribución Eléctrica, Control Contra Incendios, y los Sensores de Medición Primaria. Todos estos sistemas funcionan mediante la integración de PLCs (Controladores Lógicos Programables), estaciones de trabajo, sensores, servidores y terminales de interfaz con el operador local. Cada pieza se interconecta e indica suposición dentro del lazo de control. Para el adecuado funcionamiento y control de las esclusas, cada edificio de maquinarias contará con un PLC principal que se encarga de procesar las señales entrantes de los transductores de nivel de agua y luego emitirlas al centro de mando que contiene el control principal.

Los controladores mencionados, se encuentran ubicados dentro de gabinetes metálicos que varían sus características dependiendo de las funciones de control para las que se encuentren dispuestos: unos controlan y procesan información para la operación y mantenimiento de las compuertas, otros lo pertinente a las válvulas y otros, realizan operaciones mixtas ya que se encargan de combinar la información proveniente de las compuertas para hacer la activación de válvulas y demás actuadores.

El PLC ejecuta los algoritmos de programación y verifica que la operación se dé según los parámetros iniciales que el operador

⁵² MI CANAL DE PANAMÁ. Avances de la ampliación [en línea]. Ciudad: Panamá. El Faro [citado 15 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: < <https://micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2016/01/elfaro-20160101.pdf>>

⁵³ Ibid., p. 20.

configure y que cumpla con todos los requisitos para lograr una operación eficiente y segura. El controlador utiliza diferentes tipos de lenguajes tales como diagramas de bloques funcionales y secuenciales con lógica estructurada para ser procesada por la Unidad Central. Con esto, se puede verificar que cada uno de los componentes se encuentre funcionando correctamente y no presente ningún tipo de fallas.

Cada uno de los sistemas tienen funciones específicas y distribuyen su trabajo de manera que el proceso sea modular y se encuentre debidamente balanceado. Por ejemplo, el Sistema de Control de Maquinarias de Esclusas controla la operación de 76 válvulas y sus respectivas unidades de potencia hidráulica. También monitorea y dirige las 8 compuertas dispuestas en cada complejo de esclusas. Por otro lado, el Sistema de Control de Distribución Eléctrica, monitoriza todos los elementos asociados al sistema de alimentación eléctrica en corriente directa baja y mediana tensión en corriente alterna (véase la Figura 39).

Figura 39. SiCME



Fuente: Autores.

1.8.7.1. Sensores. Los sensores son dispositivos diseñados para la recepción de información proveniente de factores externos, en este caso, se encuentran instalados en las esclusas y maquinaria. El procesamiento de esta información es realizado por los PLC, para ejercer control sobre variables como el nivel de agua, la posición y la velocidad de operación de las compuertas.

Según Rafael Aguilar⁵⁴, ingeniero electrónico, menciona que: “si no hay medición, no hay control”. Hace énfasis en que los transductores de nivel de agua son instrumentos con sensores de radar que se encargan de la operación del llenado y vaciado de las esclusas, mediante la activación de las válvulas dispuestas para tal fin. Las señales emitidas por los sensores pueden ser digitales o análogas y son conducidas a través de fibra óptica o cobre hasta los terminales de entrada y salida del PLC.

⁵⁴ Ibid., p. 22.

1.8.7.2. Consolas HMI del Edificio de Control hasta el sensor. El operario puede verificar el estado de cada una de las etapas de control gracias a una interfaz denominada HMI (Human-Machine-Interface). La cual se compone de pantallas de consola y video para realizar el seguimiento y monitoreo necesario para el proceso de esclusaje.

El centro de control se encuentra dispuesto de una serie de animaciones y gráficas que le proporcionan al operario el estado real de las compuertas y válvulas, los niveles de agua, flotabilidad de las compuertas, para de esta manera, detectar presencia de buques y objetos cerca de las compuertas. Los datos obtenidos se presentan de manera automática y en tiempo real, con el fin de proveer los criterios para realizar actividades de mantenimiento preventivo o correctivo. La Figura 40 muestra las consolas HMI del Centro de Control.

Figura 40. Consolas HMI del Edificio de Control hasta el sensor



Fuente: Autores.

1.8.7.3. Software HMI. Este software evidencia el sistema hidráulico actual en comparación con el mecánico que operaba anteriormente. Hay una reducción de partes móviles, dejando como factor principal de funcionamiento a un cilindro. La presión que ejerce el líquido hace que el pistón sea empujado y se mueva fácilmente. Utilizar este tipo de cilindros permite trabajar con tareas pesadas y adicionalmente, entre menos partes móviles se utilicen, menos mantenimiento.

Componentes dentro de las consolas HMI:

- Panel del Pulsador de Emergencia.
- Sistemas de Gestión de Tráfico de Buques.
- Sistema de Posicionamiento de Buques.
- Estación de Trabajo.
- Pantalla de video.
- Sistema de Evacuación.
- Pantalla de diagnóstico de maquinaria.

- Sistema de distribución de energía.
- Pantalla de Niveles de Agua.
- Sistema de Control de Maquinarias.

1.8.7.4. Power Distribution SCADA. Como se puede evidenciar en la Figura 41, el sistema SCADA contiene todo tipo de indicadores necesarios para señalar el estado de los componentes del sistema de esclusas. El principio de funcionamiento básico es el siguiente:

- Se abren las válvulas ubicadas en el norte en ambas direcciones.
- Las alcantarillas empiezan a llenar la cámara correspondiente a las válvulas accionadas anteriormente, lo cual puede verificarse con el color que va tomando el sistema. A medida que el color azul se vuelve más fuerte, indica la profundidad en el llenado.
- Cuando las cámaras tienen el mismo color indicativo, significan que los niveles están ecualizados y se procede con la apertura de las puertas.
- Finalmente, el barco puede salir de las esclusas.

Figura 41. SCADA



Fuente: Autores.

1.8.8. Programa de Mantenimiento. Las órdenes de trabajo para el programa de mantenimiento directo o indirecto son generadas por los programadores de las diferentes unidades. Cada una administra unos estándares y parámetros que contienen información sobre el equipo, código de identificación, frecuencia de inspección y área de responsabilidad. El sistema de esclusas utiliza dos tipos de mantenimiento: Preventivo y Correctivo.

1.8.8.1. Mantenimiento preventivo. Indica todas las actividades realizadas de manera anticipada con el fin de prevenir algún tipo de falla o avería en el sistema. Se efectúa de manera periódica para evitar costos de reparación, disminuyendo la probabilidad de imprevistos.

Su alcance comprende los componentes principales del sistema tales como: motores principales, sistemas de freno, transmisión, ejes de acoplamiento, sistema de tensión, poleas, cables de acero e instrumentación en general.

- **Mantenimiento preventivo directo.** Cumple las siguientes características:
 - Tiempo fijo.
 - Cuidado básico y esencial: no hay objetos extraños, limpieza adecuada, lubricación, ajustes, no existen deformaciones visibles, reemplazos mínimos, no hay corrosión. Además, es necesario hacer inspecciones al Sistema de Tensión. El operador verifica la no existencia de fugas (presión de nitrógeno/aceite) en la estación de acumuladores (Válvulas, sensores, sellos, mangueras, tuberías)
- **Mantenimiento preventivo indirecto.** Cumple las siguientes características:
 - Monitoreo de condición. Puede ser objetivo o subjetivo:
 - ✓ Subjetivo: Depende del operario a ejecutar la tarea y las sensaciones sobre la situación actual del sistema (vista, olfato, tacto)
 - ✓ Objetivo: Depende de problemas específicos evidentes tales como vibración, análisis de infrarrojo y aceite.

1.8.8.2. Mantenimiento correctivo. Es el más básico, se encarga de corregir los defectos observados en los equipamientos.

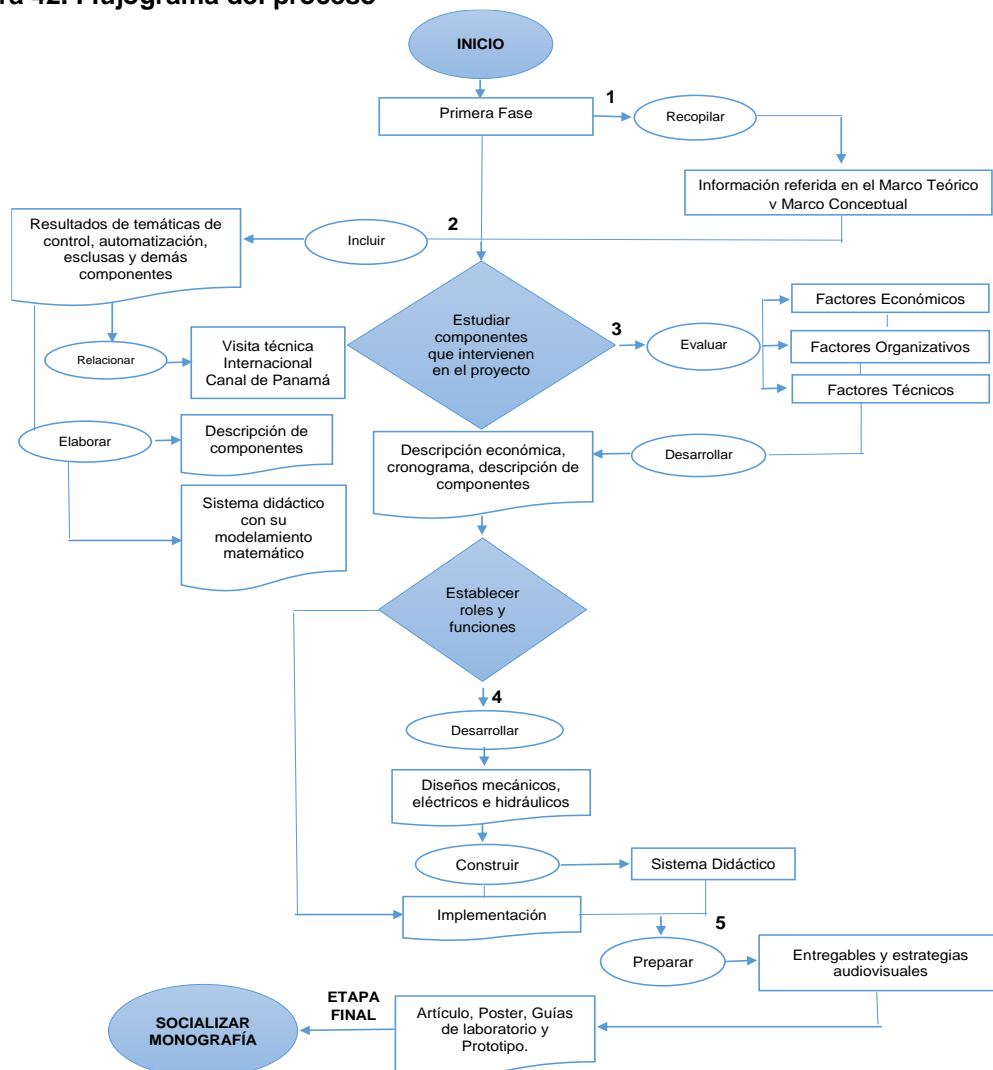
- **Mantenimiento correctivo planeado:**
 - Monitoreo de la condición en caliente
 - Programado, teniendo en cuenta la vida útil de los equipos
- **Mantenimiento correctivo No planeado:**
 - El sistema puede operar hasta fallar, en ese caso, el mantenimiento debe ser ejecutado de manera urgente, en un medio no controlado y que requiere de respuesta inmediata.

1.9. METODOLOGÍA

1.9.1. Diseño metodológico. El presente trabajo de grado se orienta hacia un estudio de tipo descriptivo. Cada una de las fases presentan una relación clara y concisa para el desarrollo general. La base fundamental del proceso se encuentra dirigida hacia la recopilación de la información descrita como la Fase 1.

La inclusión de todas las temáticas de control, automatización que van relacionados con la definición un modelo matemático y la descripción de componentes, se desarrollan en la Fase 2. La evaluación de los factores económicos, organizativos y técnicos culminan en la Fase 3 y su respectiva aplicación para lograr la implementación final del sistema didáctico para el control de nivel con tanques aplicados en la Fase 4. La figura 42 muestra el flujograma del proceso.

Figura 42. Flujograma del proceso



Fuente: Autores.

1.9.2. Búsqueda y recopilación de información. Las actividades descritas corresponden a las fases 1 y 2. Se realizó la búsqueda y recopilación de información posible, la cual se divide en las siguientes partes:

- Búsqueda de información necesaria para la realización del diseño de un sistema didáctico de tanques acoplados para el control de caudal y nivel con empresas o grupos de investigación con experiencia en dichos componentes.
- Visita Técnica Internacional al Canal de Panamá para incluir los resultados posibles de apropiación y transferencia tecnológica al país, sobre aspectos como sistemas de control y automatización, principios del funcionamiento de las esclusas y componentes electrónicos o mecánicos expuestos allí.

La agenda guiada por la Universidad Católica de Colombia en la visita técnica internacional al Canal de Panamá se presenta en la Figura 43.

Figura 43. Agenda Visita Técnica Internacional

HORA	Lunes 31 Julio	Martes 01 Agosto	Miércoles 02 Agosto	Jueves 03 Agosto	Viernes 04 Agosto	Sábado 05 Agosto
7:00 AM	6:00am Llegada a Aeropuerto Internacional El Dorado	7:00am - 8:00 am Desayuno.	7:00am - 8:00 am Desayuno.	7:00am - 8:00 am Desayuno.	7:00am - 8:00 am Desayuno.	7:00am - 8:00 am Desayuno.
9:00-12.00 a.m.	Llegada Aeropuerto Internacional de Tocumén. Traslado al Hotel.	Visita Esclusas de Miraflores. - Recorrido por las esclusas de Miraflores. Ing. Carlos Patterson	8:30am - 11.00am Visita Industrial en Pascual Productos Alimenticios.	9:00am. Visita Empresarial (OP. NESTLE. Procesos logísticos. Centro de distribución)	9:00 am Zona Libre Colon y/o Manzanillo Internacional Terminal	Visita Esclusas de Cocolí Recorrido por las esclusas de Cocolí. Ing. Rafael Alvarado
2:00-5:30 p.m.	Visita a Universidad Tecnológica de Panamá: -Conferencias de profundización por parte de expertos de tecnología de Panamá. - Historia del Canal. - Procesos constructivos utilizados. - Sistemas de automatización y logística del canal de Panamá	1:30 pm Recorrido por la Ciudad del Saber. 2:30 p.m. Edificio 217: Datacenter de Cable Onda. Edificio 219: Instituto de Investigaciones Avanzadas y Servicios de Alta Tecnología, INDICASAT. Visita al Museo del Canal de Panamá en el centro histórico.	City tour Visita al Paseo de Amador Causeway y Museo de la Biodiversidad	2:00 pm Visita al proyecto de Panamá Pacífico 8 Complejo de uso mixto situado al oeste de Panamá.	Recorrido por: -Casco antiguo de Panamá. -Panamá Viejo. -Puente Centenario. -Metro de Panamá. -Paseo de las Bobedas.	Traslado hacia el DECAMERON DE PLAYA BLANCA

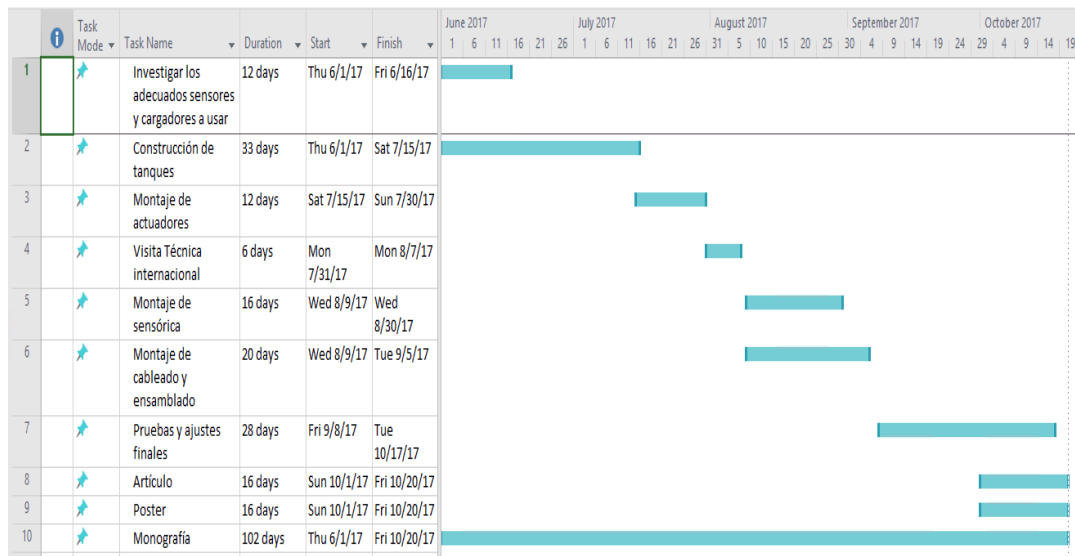
Fuente: Misión Académica Internacional 2017-III. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia.

- Luego de indagar sobre las estrategias de control para el funcionamiento de tanques acoplados, se hizo la respectiva identificación de los actuadores y sensores apropiados para el sistema didáctico de tanques acoplados.
- Se realizó el diseño del sistema didáctico con su correspondiente modelamiento matemático.
- Se determinó el respectivo protocolo de comunicación del sistema para el control y manejo de las variables involucradas en el proceso.

1.9.3. Planificación. En la fase 3 se estudiaron todos los factores que afectaron al proyecto y se realizó la planeación respectiva:

- Factores económicos: Se evaluaron los recursos financieros y el presupuesto del proyecto de grado para la entrega respectiva de los productos finales (documento, artículo y prototipo).
- Factores organizativos: La Figura 44 muestra el cronograma de actividades que se ejecutó a cabalidad y se determinaron los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia como lugares de trabajo para la implementación del proyecto de grado.

Figura 44. Cronograma de actividades



Fuente: Autores.

- Factores técnicos: Se determinaron las herramientas y materiales de trabajo necesarios para la implementación del sistema.

- 1.9.4. Construcción y ejecución.** En la fase 4 se establecieron las funciones y roles de cada uno de los integrantes del proyecto de grado para su posterior ejecución. Se desarrollaron todos los diseños planteados (mecánicos, eléctricos e hidráulicos) mediante técnicas de fabricación adecuadas y se realizó la manipulación de todos los recursos y materia prima disponible para su construcción.
- 1.9.5. Seguimiento y evaluación.** Después de la implementación de la fase 4, se incluyeron todas las actividades de seguimiento y pruebas que fueron sometidas a un análisis continuo sobre la ejecución del proyecto en todos sus aspectos, vigilando que se ajustara a lo planificado y realizando las modificaciones necesarias para dar cumplimiento de los objetivos planteados.
- 1.9.6. Divulgación.** Comprende las actividades de (Preparación de entregables y estrategias audiovisuales para la socialización de la monografía realizada) mediante un artículo, sencillas guías de laboratorio y un prototipo implementado que tiene como fin, muestra de resultados, transferencia de conocimientos y tecnología para futuros estudios.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1.1. Sensor de flujo YF-s201 de SEA Electronics. Es un sensor que está construido con material plástico, posee un rotor de agua y un sensor de efecto Hall, su función principal es medir a través de sus aspas la cantidad de agua que pasa por su interior, el rotor de agua contiene un imán el cual gira donde mediante el sensor de efecto Hall registra cada una de las vueltas dadas en el molino (rotor), se generan ciertos impulsos dependiendo la velocidad a la que el agua este circulando (véase la Tabla 8).

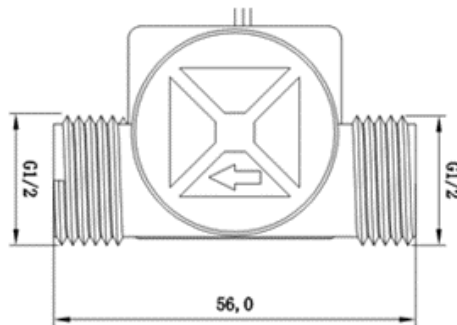
El sensor de flujo YF –s 201 consta de 3 cables, el rojo es para la energía donde esta puede variar entre 5 y 24 VDC, el amarillo hace lectura respectiva de los pulsos generados por el efecto Hall y el negro va directamente a tierra, cada pulso está cerca de 2.25 mililitros (véase la Figura 45).

Tabla 8. Características del sensor de flujo

Modelo	YF-S201
Tipo de sensor	Efecto Hall
Voltaje de funcionamiento (v)	5 V– 18V
Consumo máximo de corriente (mA)	15mA
Caudal (L/m)	1 a 30 L/m
Tipo de Salida (v)	5V TTL
Rango de temperatura de trabajo (°C)	-25 °C - 80 °C
Rango de Humedad de trabajo (%)	35% - 80 % RH
Precisión (%)	± 10%
Presión máxima de trabajo (Mpa)	2.0 Mpa
Pulsos por litro	450
Durabilidad	300.000 ciclos
Conexión de tubería	½ pulgada
Detalles de conexión	
Cable rojo (v)	+5V
Cable negro	Ground
Cable amarillo	Salida PWM

Fuente: Autores.

Figura 45. Dimensiones sensor de flujo yf-s201 de Sea Electronics



Fuente: NEXTIAFENIX. (2017). Caudalímetro YF-S201. [en línea]. [citado 26 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.nextiafenix.com/producto/yf-s201/>>

2.1.2. Válvula solenoide 2W-160-15. La válvula Solenoide de referencia 2W160-15, permite una apertura de 16 milímetros, compatible con rosca de media pulgada, se encuentra normalmente cerrada como se muestra en la Figura 46. El embobinado que tiene esta válvula es de alambre de cobre con módulo de refrigeración revestida de aluminio, aunque no se aconseja que se trabaje por prolongadas horas ya que esto ocasionaría que la bobina se fracturara por el mismo calentamiento de esta. Para verificar las características de la válvula, referirse a la Tabla 9.

Puede ser instalada en cualquier ángulo, pese a ello, se recomienda posicionarla en dirección horizontal. Se utiliza para controlar automáticamente el agua, aire, aceite y gas en la tubería.

Figura 46. Válvula solenoide



Fuente: VISTRONICA. (2017). Electroválvula 110VAC ½ pulgada 2W-160-15. [en línea]. [citado 26 de septiembre]. Disponible en Internet. <<https://www.vistronica.com/valvulas/electrovalvula-110vac-12-2w-160-15-detail.html>>

Tabla 9. Características de la válvula solenoide

Medio de funcionamiento	Aire, agua, aceite, gas
Voltaje de operación (VAC)	· 110VAC
Modo de operación	Acción directa
Tipo de accionamiento	Normalmente cerrada
Tamaño de puerto (pulgadas)	G1/2
Operación de viscosidad de fluido	Por debajo de 20 CST
Operación de presión (MPa)	· Aire: 0MPa~1.0MPa · Agua: 0MPa~0.7MPa · Aceite: 0.9MPa
Resistencia máxima de presión (MPa)	1.0Mpa
Temperatura de operación (°C)	-5°C~+120°C
Rango de voltaje (%)	±10%
Material de la estructura	Cobre
Material de sello de aceite	NBR o VITON

Fuente: Autores.

2.1.3. Sensor ultrasonido HC-SR04. El HC-SR04 fabricante genérico en China, 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 (véase la Figura 47).

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

Figura 47. Sensor de ultrasonido HC-SR04



Fuente: ELECTRONILAB. (2017). Sensor de Distancia de Ultrasonido HC-SR04. [en línea]. [citado 26 de septiembre]. Disponible en Internet: < <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-hc-sr04/>>

Posee las siguientes características:

- Los módulos incluyen transmisores ultrasónicos, el receptor y el circuito de control.
- 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.
- Corriente de reposo: < 2mA.
- Corriente de trabajo: 15mA.
- Ángulo de medición: 30°.
- Ángulo de medición efectivo: < 15°.
- Detección de 2cm a 400cm o 2.54 cm a 396, 24 cm (Sirve a más de 400cm, pero el fabricante no garantiza una buena medición).
- “Resolución” La precisión puede variar entre los 3mm o 0.3cm.
- Dimensiones: 45mm x 20mm x 15mm.
- Frecuencia de trabajo: 40KHz.

Su funcionamiento puede resumirse en las siguientes actividades:

1. Enviar un Pulso "1" de al menos de 10µS por el Pin Trigger (Disparador).
2. El sensor enviará 8 Pulsos de 40KHz (Ultrasonido), 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 50 microsegundos de espera después de terminar la cuenta.
5. La distancia es proporcional a la duración del pulso y puedes calcularla con las siguiente formula (Utilizando la velocidad del sonido = 340m/s):
Distancia en cm (centímetros) = Tiempo medido en microsegundos x0.017

2.1.4. Bomba DC-12V. Es una bomba de agua ajustable, está diseñada totalmente sumergible para agua dulce y agua salada como lo muestra la Figura 48.

Figura 48. Bomba DC-12V



Fuente: ELECTRONILAB. (2017). Bomba de agua sumergible ajustable -9-12VDC-500L/H. [en línea]. [citado 26 de septiembre]. Disponible en Internet: < <https://electronilab.co/tienda/bomba-de-agua-sumergible-9-12vdc-500lh/>>

La Tabla 10 presenta las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 10. Especificaciones técnicas bomba

Voltaje (V)	DC5.5-12V
Frecuencia (Hz)	50Hz / 60Hz
Potencia (potencia) (W)	1-3W
Flujo (Salida) (L/H)	200 L / H
Cabeza (H-Max) (mts)	0-1.5 mts
Peso (Kg)	0.1Kg
Color	Negro
Material	Plástico
Longitud del cable (cm/pulgadas)	Aprox. 145cm / 57 pulgadas
Dimensiones (mm)	39 x 38 x 28mm
El diámetro de la boquilla de agua (mm)	8mm

Fuente: Autores.

2.1.5. Arduino mega 2560

El Arduino Mega 2560 es un tablero de microcontroladores basado en el ATmega 2560. Tiene 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio (véase la Figura 49).

Figura 49. Microcontrolador Arduino Mega 2560



Fuente: ARDUINO. Mega 2560. Bogotá [citado 15 de octubre]. Disponible en internet: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>

Para verificar las especificaciones técnicas del Arduino Mega, referirse a la Tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones Arduino Mega

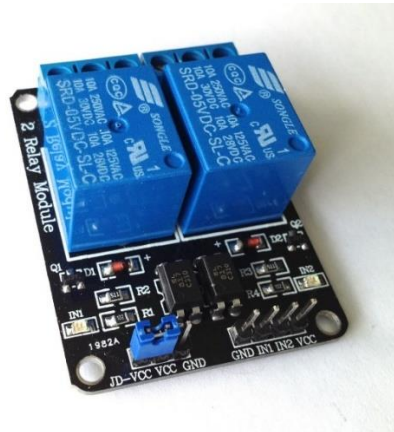
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento (V)	5V
Voltaje de entrada (recomendado) (V)	7-12V
Voltaje de entrada (límite) (V)	6-20V
Pines de E / S digitales	54 (de los cuales 15 proporcionan salida de PWM)
Clavijas de entrada analógica	dieciséis
Corriente DC por Pin E / S (mA)	20 mA
Corriente DC para 3.3V Pin (mA)	50 mA
Memoria flash (KB)	256 KB de los cuales 8 KB utilizados por el gestor de arranque
SRAM (KB)	8 KB
EEPROM (KB)	4 KB
Velocidad de reloj (MHz)	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud (mm)	101.52 mm
Anchura (mm)	53.3 mm
Peso (gr)	37 gr

Fuente: ARDUINO. Mega 2560. Bogotá [citado 15 de octubre]. Disponible en internet: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>

2.1.6. Módulo Relé De 2 Canales

El Módulo Relé de 2 canales permite conmutar cargas de potencia de hasta 10A y 250VAC (30VDC). Las entradas de control se encuentran aisladas con optoacopladores para minimizar el ruido percibido por el circuito de control mientras se realiza la conmutación de la carga. La señal de control puede provenir de cualquier circuito de control TTL o CMOS como un microcontrolador o un Arduino (véase la Figura 50).

Figura 50. Módulo de relés



Fuente: ElectroniLab. Módulo relé de 2 canales. Bogotá [citado 15 de octubre]. Disponible en internet:< <https://electronilab.co/tienda/modulo-rele-de-2-canales-salidas-optoacopladas/>>

La tabla 12, presenta las siguientes características técnicas:

Tabla 12. Características técnicas Módulo Relé

Voltaje de operación (VAC/VDC)	250VAC/30VDC
Voltaje de alimentación de la tarjeta (Relé) (V)	5V
Corriente de operación (A)	10A
Canales	2 (independientes protegidos con Optoacopladores)
Indicador	1 led por cada canal (relé activo)

Fuente: ElectroniLab. Módulo relé de 2 canales. Bogotá [citado 15 de octubre]. Disponible en internet:< <https://electronilab.co/tienda/modulo-rele-de-2-canales-salidas-optoacopladas/>>

2.2. MATERIALES

Los materiales para el desarrollo del prototipo de tanques fueron los siguientes:

- Diez (10) Flanches.
- Tres (3) válvulas manuales.
- Una (1) válvula solenoide.
- Manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada.
- Tubería y conectores de $\frac{1}{2}$ pulgada.
- Una (1) placa de acrílico 150 cm x 150 cm. Color cristal.
- Una (1) placa de acrílico 150 cm x 150 cm. Color humo.
- Dos (2) sensores de flujo YF – s201.
- Dos (2) sensores de ultrasonido HC-SR04.

3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El prototipo diseñado para el sistema didáctico de tanques acoplados, es un modelo bastante resistente y robusto. Se fabricó con dos placas de acrílico, una de color cristal y otra de color humo. Este sistema consta de 3 tanques: Un tanque reservorio para la contención del agua, el cual fue diseñado con las siguientes dimensiones: 60 cm de ancho, 40 cm de largo y 20 cm de alto; y dos tanques (N1 y N2 respectivamente) para realizar el control de nivel de líquido en los que se efectúan las respectivas prácticas de laboratorio.

Sus dimensiones son: 20 cm de ancho, 20 cm de largo y 40 cm de alto. Se acoplan por medio de una válvula solenoide que se encarga de permitir el paso de líquido conforme sea la necesidad de la práctica a desarrollar.

Posee una bomba sumergible de rotor magnético permanente, que extrae líquido desde el tanque reservorio a través de una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada pasando luego por un sensor de flujo YF- s201 de la Marca Sea-Electronics ®, la cual determina la cantidad de líquido que está entrando al tanque N1 en un tiempo determinado.

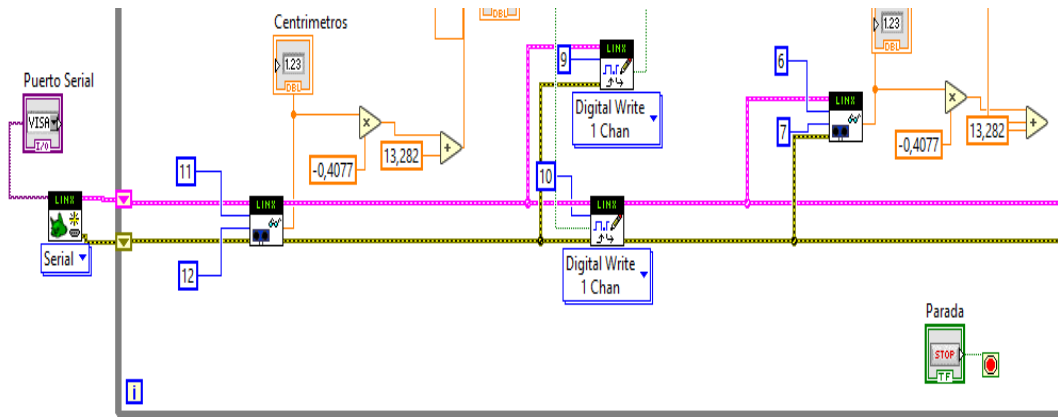
La planta cuenta además con 3 válvulas manuales para generar diferentes modificaciones y perturbaciones en los procesos de cada tanque, teniendo a su vez una función de desagüe para el sistema, transportando el agua nuevamente hacia el tanque reservorio.

Los tanques N1 y N2 cuentan con sensores de ultrasonido HC-SR04 fabricante genérico en China, que se encargan de determinar el nivel de agua al que se encuentran. Estos sensores presentan una excelente supresión de fondo y cierta inmunidad ante todo tipo de impurezas del aire dentro de los tanques, por ende, no perturban el tipo de mediciones que se realizan sobre el líquido.

Para la comunicación de datos entre módulos e interfaz se utilizó la librería de soporte de Arduino Mega 2560 para LabView 2016, que básicamente funciona como un Toolkit llamado LIFA. Se puede descargar de manera gratuita desde el servidor de NI (National Instruments) y permite adquirir datos del microcontrolador Arduino Mega 2560 para hacer el procesamiento requerido desde el entorno de programación gráfica.

Allí, se adecuaron las entradas y salidas a manera de bloques para que en ellas se obtengan los valores de caudal y nivel respectivamente. El sistema queda configurado como se evidencia en la Figura 51.

Figura 51. Programación de entradas y salidas del sistema en LabView



Fuente: Autores.

4. IMPLEMENTACIÓN

Para realizar la implementación del prototipo del sistema didáctico para el control de nivel con tanques acoplados, se siguieron los pasos enunciados a continuación:

1. Definición de equipos necesarios.
2. Diseño en 3ds Max de los tanques.
3. Proceso de fabricación de los tanques.
4. Acople de tubería.
5. Pruebas para fugas de agua.
6. Diseño de la interfaz gráfica en LabView 2016.
7. Diseño de circuitería.
8. Producto implementado.

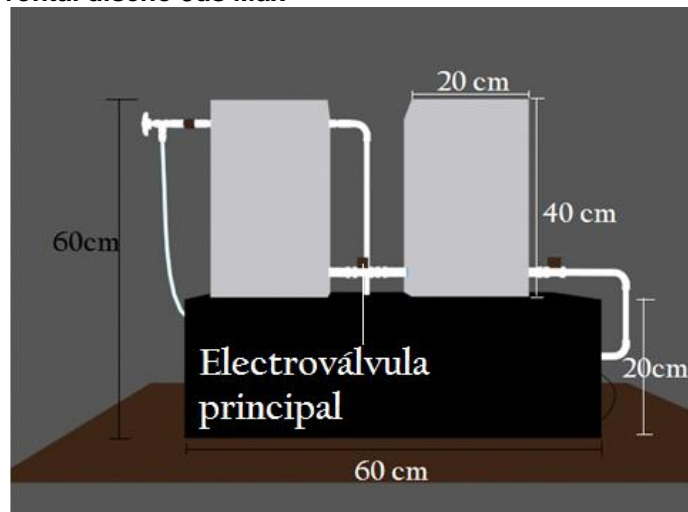
En el desarrollo de la planta fue necesario definir diferentes parámetros e instrumentaria, y así lograr un montaje exitoso con la intención de dar un funcionamiento adecuado al sistema de tanques. Para la definición del diseño, se inició con la elaboración detallada de una consulta de varias fuentes y tener una clara idea de lo que se llevaría a cabo.

La construcción de tanques requiere de cuidado y dedicación puesto que, para el trabajo y la manipulación de líquidos, los tanques tienen que estar totalmente sellados. Se estableció desde un principio la compra de los siguientes materiales para la realización y ensamblaje de los tanques:

- Lamina de 3 metros x 3 metros de acrílico color cristal.
- Lamina de 3 metros x 3 metros de acrílico color humo.
- Tubo de 6 metros en PVC de ½ pulgada.
- Codos, niples, conectores hembra macho, flanches, silicona y sikaflex.
- Soldadura y limpiador de PVC.
- Electroválvula de ½ pulgada solenoide.
- 3 válvulas de ½ pulgada manuales.

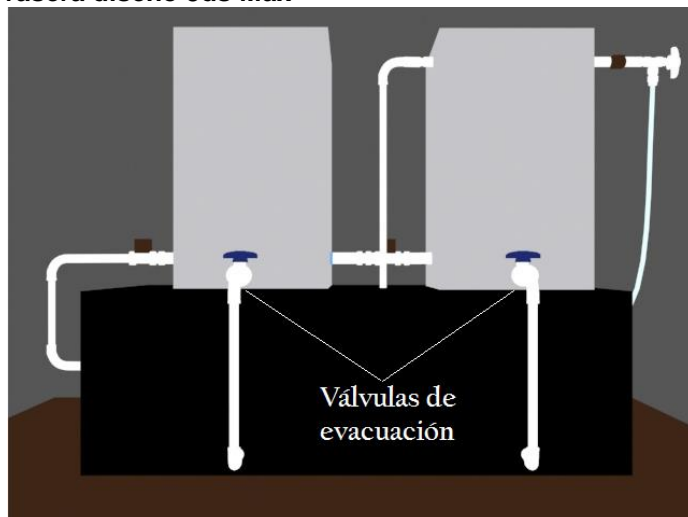
Posteriormente se realizó un diseño de los tanques en 3ds Max como se evidencia en las Figuras 52, 53, 54, 55, 56 y 57, mediante un programa que permite la creación de animaciones en tercera dimensión lo que da como resultado una imagen clara y concreta de lo que sería el sistema, indicando posiciones de las tuberías, posición de las válvulas y demás elementos que componen todo el sistema.

Figura 52. Vista Frontal diseño 3ds Max



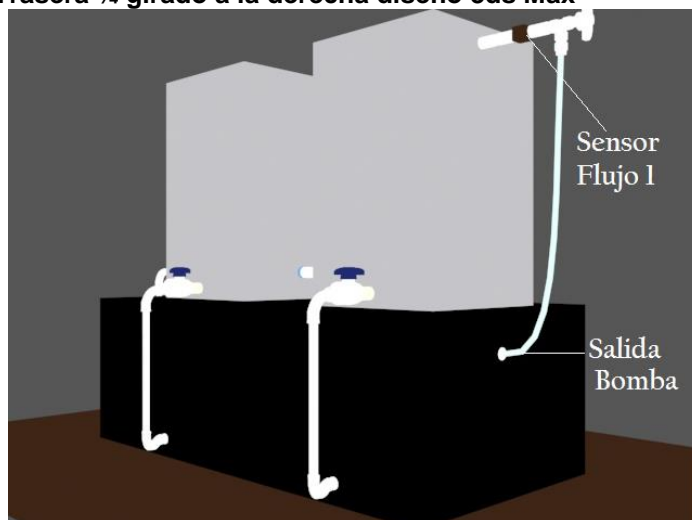
Fuente: Autores.

Figura 53. Vista Trasera diseño 3ds Max



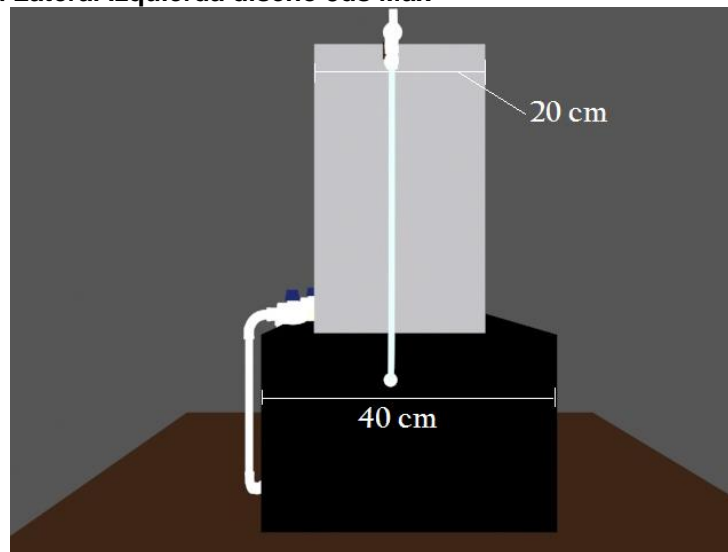
Fuente: Autores.

Figura 54. Vista Trasera 3/4 girado a la derecha diseño 3ds Max



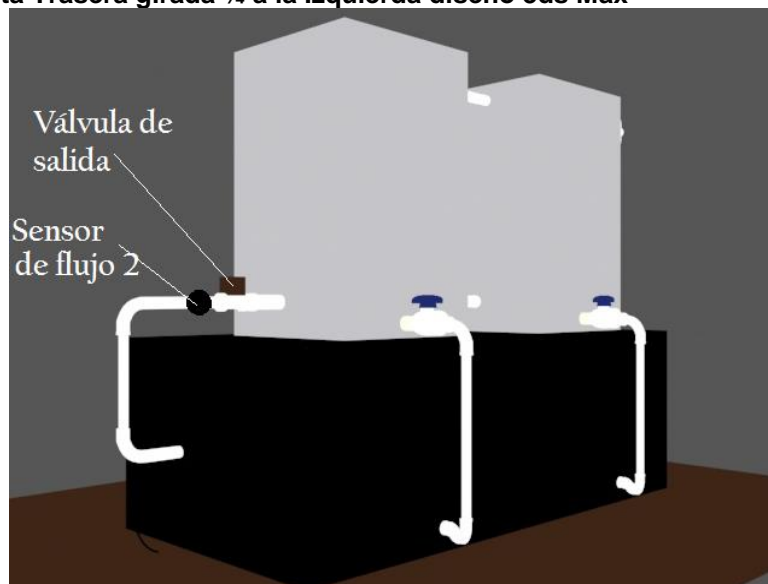
Fuente: Autores.

Figura 55. Vista Lateral Izquierda diseño 3ds Max



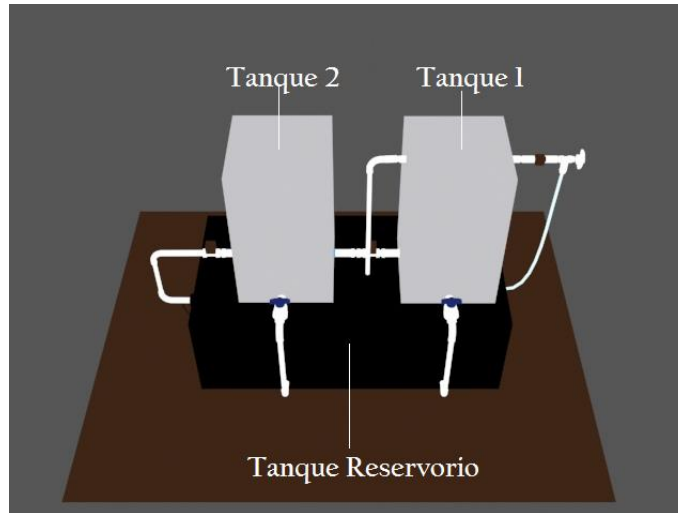
Fuente: Autores.

Figura 56. Vista Trasera girada 3/4 a la Izquierda diseño 3ds Max



Fuente: Autores.

Figura 57. Vista Trasera Aérea 45° diseño 3ds Max



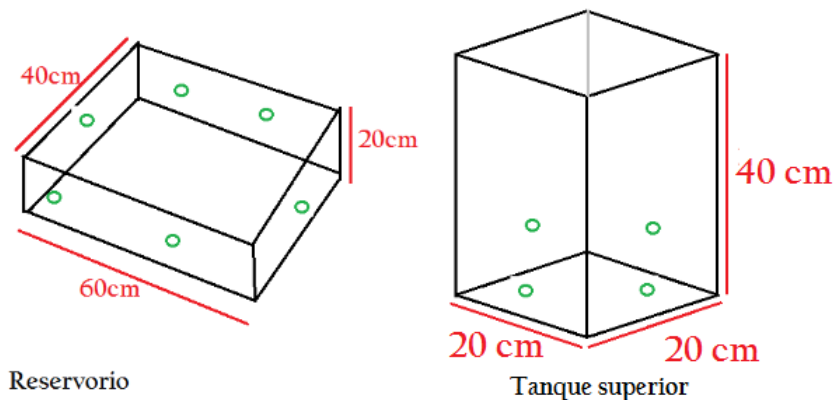
Fuente: Autores.

En la etapa de elaboración de los tanques, se utilizó como materia prima dos láminas de acrílico de 3 metros x 3 metros. Para el tanque reservorio, se utilizó una lámina de color Humo; luego se procede a seccionar con una cortadora laser una lámina de 20 cm x 200 cm, después con la ayuda de un taladro de base se perforan los agujeros de 1 pulgada que cumplirán la función de acoplar los flanges y su red de tubería.

A continuación, realiza tres dobleces con una plancha dobladora con ángulos de 90°, de tal modo que el tanque quedará con dos lados de 40 cm y dos lados de 60 cm, seguido de estos dobleces se realizan dos cortes de 60 cm x 40 cm para las tapas superior e inferior y finalmente se pegan las secciones cortadas con cloruro de metileno.

Para los dos tanques de 20 cm x 20 cm x 40 cm el proceso es idéntico, salvo que solo se necesita la tapa inferior en cada uno de los tanques (véase la Figura 58).

Figura 58. Medidas Tanques



Fuente: Autores.

En la etapa de acople de la tubería, se utilizó un tubo de 6 metros de ½ pulgada en su abertura, segmentado en las partes necesarias para crear la red de ductos por donde el agua se transportará de un tanque al otro. A su vez se usaron diferentes conectores para PVC tales como codos, flanches, adaptador hembra macho, macho hembra de rosca y niple de rosca continua.

Con el objetivo de hacer posible el acople de todos estos elementos, el uso de componentes como sikaflex, cinta teflón, silicona y pegante PVC, creando todo un sistema funcional de canales hidráulicos, dicho procedimiento se puede observar en las Figuras 59, 60 y 61.

Figura 59. Inicio de acople de tubería



Fuente: Autores.

Figura 60. Acople de tubería



Fuente: Autores.

Figura 61. Tubería acoplada



Fuente: Autores.

Se pudo realizar satisfactoriamente, sin ningún tipo de inconvenientes el proceso de acople de tuberías, dándole paso a la primera prueba con agua como se evidencia en la Figura 62, para revisar la cantidad de fugas que por la presión generada por el peso del agua en cada uno de los tanques surgía a medida que se iba abriendo paso por cada uno de los canales, además se tuvo que realizar más de una prueba para garantizar la comprobación del sistema, el cual no debe presentar fugas y a su vez poder acceder eléctricamente la planta.

Figura 62. Prueba de llenado y anti fugas



Fuente: Autores.

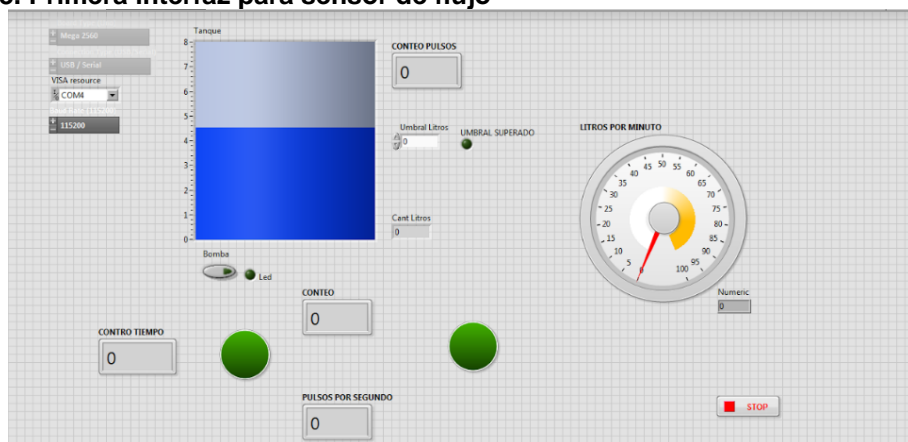
Posterior a la operación de llenado de los tanques y comprobar la ausencia de fugas hidráulicas, el siguiente paso es la interconexión de los sensores y actuadores con el micro controlador y a su vez las respectivas conexiones eléctricas del sistema. Por otro lado, el micro controlador que es utilizado para el

prototipo es el ARDUINO MEGA 2560, dispositivo utilizado como puente entre los aparatos y la interfaz gráfica.

Y así poder controlar la planta desde dicha interfaz programada en LABVIEW 2016, desde donde se controla todo el sistema y se monitorea cada uno de los datos censados como, sensores de flujo en cargados de medir la cantidad de litros de agua que ingresa y sale de la planta, sensores de ultrasonido que miden el nivel de agua que se encuentra en cada uno de los tanques.

En la Figura 63 se observa una primera interfaz utilizada para diseñar la caracterización y funcionamiento del sensor de flujo que aporta la cantidad de litros por segundo que ingresa a la planta.

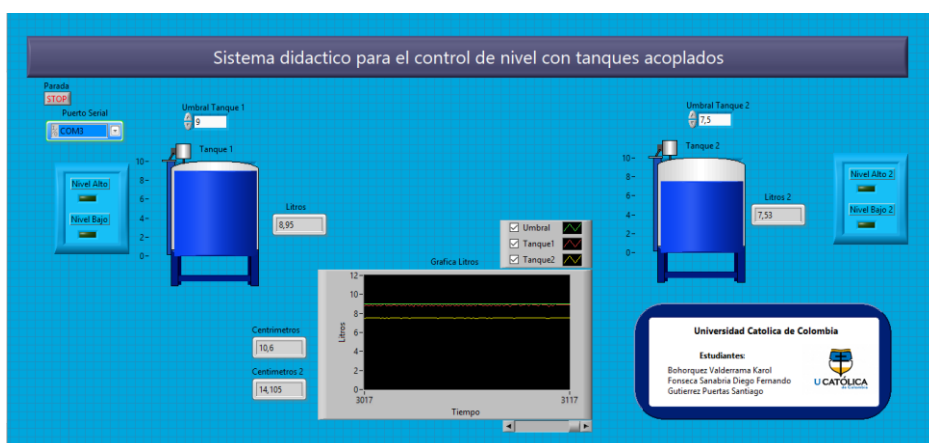
Figura 63. Primera interfaz para sensor de flujo



Fuente: Autores.

En la Figura 64 se observa la interfaz gráfica que será la encargada de controlar todo el sistema didáctico de la planta. Esta interfaz tiene el objetivo de monitorear los diferentes datos del sistema arrojados por los controladores, como lo son las gráficas, los niveles de líquido y la cantidad de litros dentro del tanque.

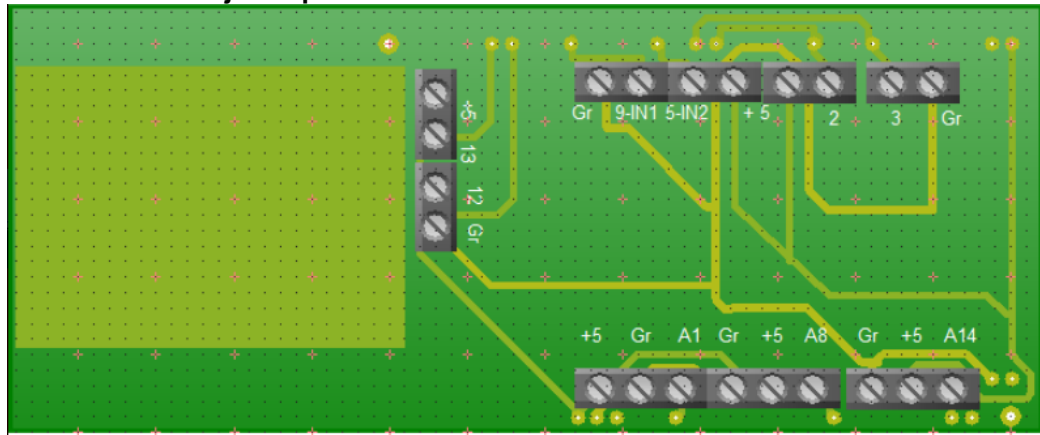
Figura 64. Interfaz Gráfica



Fuente: Autores.

Para facilitar la identificación de cada una de las conexiones se desarrolló una tarjeta “Shield” con el objetivo asegurar las conexiones entre los dispositivos y el Arduino Mega 2560, permitiendo al usuario identificar rápidamente los contactos que se tienen como se puede evidenciar en la Figura 65.

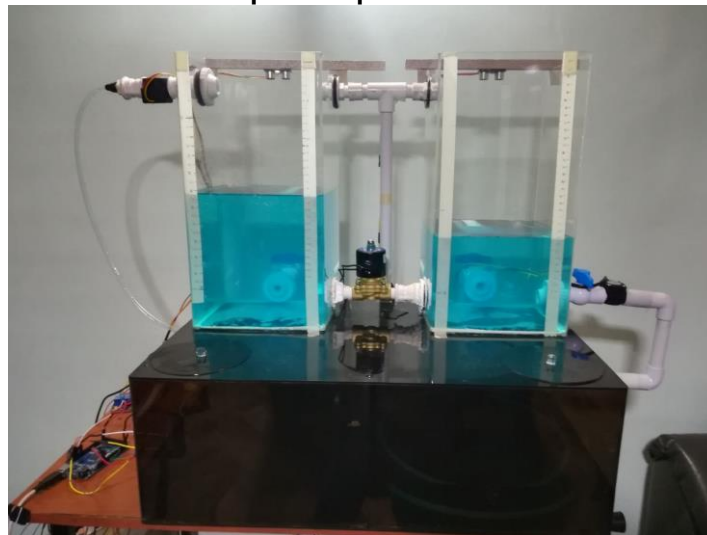
Figura 65. Diseño tarjeta Tipo - Shield PCB WIZARD



Fuente: Autores.

Finalmente se tienen unos tanques funcionales para poder realizar las actividades didácticas que el sistema permita desarrollar y se aplica un colorante al fluido depositado en los tanques que mejora la visualización del nivel de agua de cada tanque y poder afirmar con certeza que ya se tiene un sistema practico y eficaz (véase la Figura 66).

Figura 66. Sistema didáctico de tanques acoplados



Fuente: Autores.

4.1. MODELAMIENTO DE LOS TANQUES ACOPLADOS

Función de transferencia total ($G_T(s)$; Véase ecuación 7):

$$G_T(s) = G_b(s)G_p(s) \quad (7)$$

Donde:

$G_b(s)$ = Función de transferencia de la bomba

$G_p(s)$ = Función de transferencia de los tanques acoplados

Las funciones de transferencia se obtienen por separado y luego se reemplazan en la ecuación 7. Es importante tener en cuenta que las unidades de las variables y constantes a utilizar para los cálculos de las funciones son las siguientes:

Unidades:

- Caudal (cm^3/seg)
- Altura (cm)
- Área (cm^2)
- Voltaje (v)

4.1.1. Función de transferencia de los tanques acoplados

Para obtener la función de transferencia de los tanques acoplados (véase la Figura 67); se debe identificar las variables del proceso, estados y perturbaciones.

Estados:

- H_1 = Nivel en el primer tanque.
- H_2 = Nivel en el segundo tanque.

Variable manipulada:

- Q_i = Velocidad de flujo de la bomba.
- Q_a = Flujo del reservorio.
- Q_b = Flujo de salida.

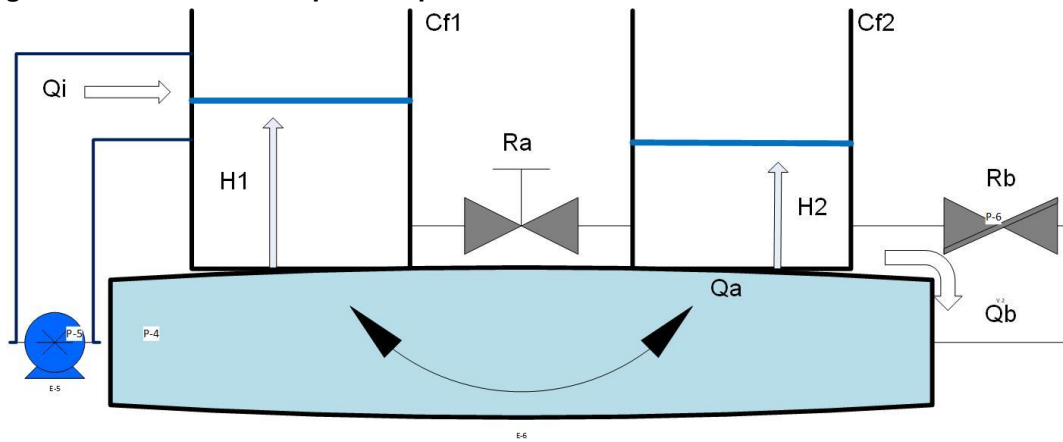
Variable controlada:

- H_2 = Nivel en el segundo tanque.

Perturbaciones:

- Variaciones en el flujo causadas por la válvula R_a y R_b .

Figura 67. Sistema de tanques acoplados



Fuente: Autores.

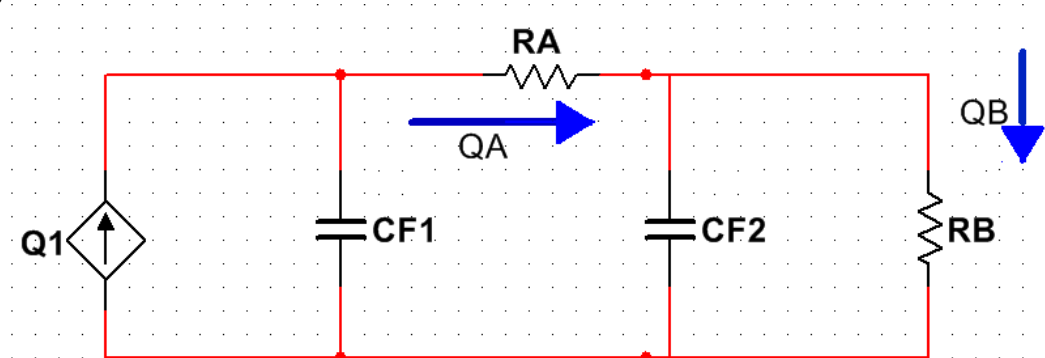
Para modelar el proceso propuesto se emplea una analogía, pasando el modelo de sistema de fluido a un diagrama de red. El sistema de tanques acoplados se reduce entonces, a una red eléctrica (véase la Figura 68) utilizando el concepto de variables generalizadas de la Tabla 13.

Tabla 13. Variables generalizadas

Sistemas Eléctricos	Sistemas de Fluidos
Corriente (I)	Caudal (Q)
Voltaje (V)	Presión (P)Altura (h)

Fuente: Autores.

Figura 68. Circuito eléctrico



Fuente: Autores.

Componentes:

- Tanques: Se representan como capacidad de fluido o capacidad hidráulica y su expresión en tanques rectos está dado por la ecuación 8:

$$C_f = \frac{A}{\rho} \quad (8)$$

Donde:

- C_f = Capacidad de fluido.
- A = Sección transversal de los tanques.
- $A = 20 * 20 = 400\text{cm}^2$.
- ρ = Peso especificado (Densidad de agua).

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

Si los tanques son iguales se tiene la ecuación 9:

$$C_{f1} = C_{f2} = C_f = \frac{A}{1} = A \quad (9)$$

Donde:

C_{f1} = Capacidad de fluido del primer tanque.

C_{f2} = Capacidad de fluido del segundo tanque.

- Válvulas: Se representan como resistencias y su expresión está dada por la ecuación 10:

$$R_f = \frac{2\sqrt{h_0}}{K_V} \quad (10)$$

Donde:

R_f = Resistencia.

h_0 = Altura inicial.

La ecuación 11, describe la Válvula A:

$$R_A = \frac{2\sqrt{H_1-H_2}}{K_V} \quad (11)$$

La ecuación 12, describe la Válvula B

$$R_B = \frac{2\sqrt{H_2}}{K_V} \quad (12)$$

Donde:

H_1 = Altura del primer tanque en el punto de operación de **33 cm**.

H_2 = Altura del segundo tanque en el punto de operación de **15 cm**.

La ecuación 13, define las constantes K_v y C_v , respectivamente.

K_v = Es definido por la norma IEC 534-1987 de válvulas de control del siguiente modo: "Caudal de agua (de 5 a 40° C) en m³ /h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de 1 bar".

$$K_v = 0,86 * C_v \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (13)$$

Tomando en cuenta que:

C_v = "Caudal de agua en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de 1 PSI. Este coeficiente depende de las dimensiones internas y de la tersura de la superficie de la válvula".

Para la válvula de control **2W160-15 2** se tiene:

$$C_v = 4,8 \text{ gpm} = 1,09 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$K_v = 0,86 * 1,09 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$K_v = 0,9374 \left[m^3/h \right]$$

Realizando la conversión de [m³ /h] a [cm³ /seg.]:

$$K_v = 260,4 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

Valor constante CV= 4.8

El circuito eléctrico de la figura 69 se resuelve aplicando el método de nodos, con la ecuación 14:

$$[y][V_n] = [I] \quad (14)$$

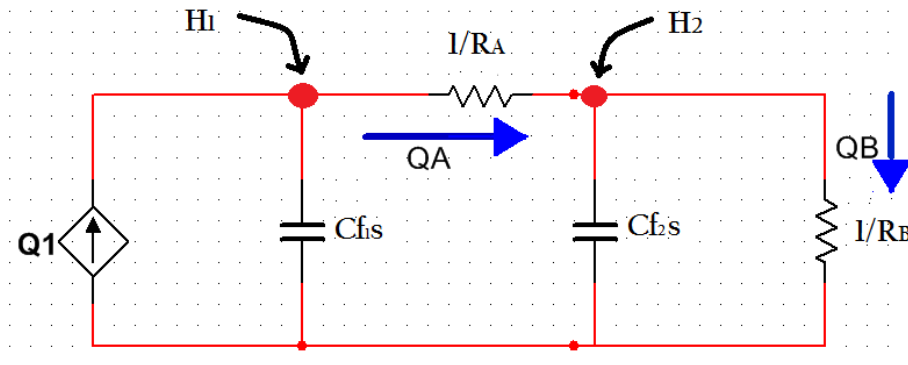
Donde:

[y]= Admitancia

[V_n]= Voltaje del nodo

[I]= Fuente de corriente

Figura 69. Método de nodos.



Fuente: Autores.

A continuación, se procede a resolver la ecuación 15 con el método de determinantes, la variable a despejar es H_2 (nivel del último tanque) como lo muestra la ecuación 16:

$$\begin{bmatrix} C_{f1}S + \frac{1}{R_A} & -\frac{1}{R_A} \\ -\frac{1}{R_A} & C_{f2}S + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$H_2 = \frac{\begin{vmatrix} C_{f1}S + \frac{1}{R_A} & Q_i \\ -\frac{1}{R_A} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} C_{f1}S + \frac{1}{R_A} & -\frac{1}{R_A} \\ -\frac{1}{R_A} & C_{f2}S + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \end{vmatrix}} = \frac{\frac{Q_i}{R_A}}{[(C_{f1}S + \frac{1}{R_A})(C_{f2}S + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}) - (\frac{1}{R_A})^2]} \quad (16)$$

Reduciendo la expresión, se obtiene la ecuación 17:

$$G_p(S) = \frac{H_2(S)}{Q_i(S)} = \frac{1}{[(R_A \cdot C_{f1} \cdot C_{f2})S^2 + (C_{f1} + \frac{C_{f1} \cdot R_A}{R_B} + C_{f2})S + \frac{1}{R_B}]} \quad (17)$$

Reemplazando los valores se obtiene la ecuación 18:

$$\begin{aligned} H_1 &= 33 \text{ cm} \\ H_2 &= 15 \text{ cm} \\ K_V &= 260,4 \text{ cm}^3 / \text{seg} \\ A &= 400 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$G_p(S) = \frac{H_2(S)}{Q_i(S)} = \frac{1}{[(\frac{2\sqrt{H_1 - H_2}}{K_V} A^2)S^2 + (A(2 + \frac{\sqrt{H_1 - H_2}}{\sqrt{H_2}}))S + \frac{K_V}{2\sqrt{H_2}}]} \quad (18)$$

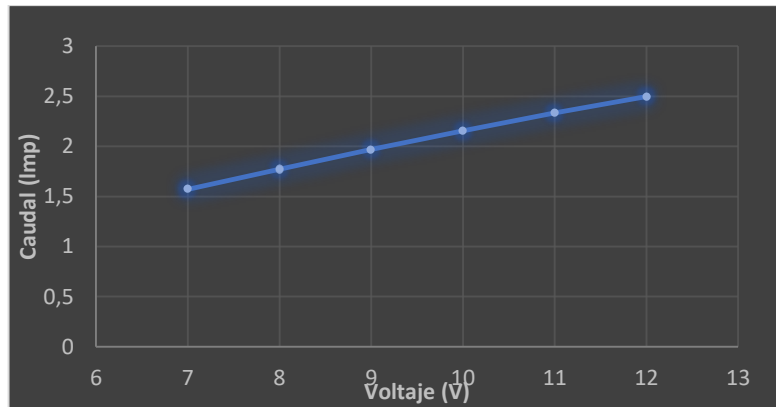
Reemplazando los valores finales se obtiene la ecuación 19:

$$G_p(S) = \frac{H_2(S)}{Q_i(S)} = \frac{1}{5213,7s^2 + 1238,17s + 33,617} \quad (19)$$

4.1.2. Función de transferencia de la bomba

La característica de la bomba evidenciada en la Figura 70, se obtuvo experimentalmente; los resultados de las pruebas y los valores adquiridos se detallan en la Tabla 14:

Figura 70. Característica de la bomba



Fuente: Autores.

Tabla 14. Valores de voltaje y caudal adquiridos experimentalmente en la bomba

VOLTAJE (V)	CAUDAL (litros por minuto)
7	1,570834085
8	1,771383491
9	1,968532795
10	2,154402484
11	2,334178016
12	2,496537614

Fuente: Autores.

Obteniendo la curva característica mencionada, se procede a realizar la función de transferencia mediante las ecuaciones 20 y 21:

$$q_b = K_b * V_{in} \quad (20)$$

Donde:

q_b = Caudal de salida de la bomba centrífuga [litros por minuto].
 V_{in} = Voltaje ingresado a la bomba centrífuga [V].
 K_b = Pendiente de la curva característica de la bomba centrífuga [litros por minuto/V].

$$q_b = \frac{2,4965(lpm) - 1,5708(lpm)}{12(V) - 7(V)} * V_{in}$$

$$q_b = 0,18514 \left(\frac{lpm}{V} \right) * V_{in}(V) \quad (21)$$

Realizando la conversión de litros por minuto a cm^3/s , se obtiene la ecuación 22:

$$q_b = 3,085 \frac{cm^3}{s} * V_{in}(V)$$

$$q_b = 3,085 * V_{in} \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (22)$$

Finalmente se encuentra la función de transferencia usando la transformada de Laplace con la ecuación 23:

$$G_b(s) = \frac{Q_b(s)}{V_{in}(s)} = K_b = 3,085 \quad (23)$$

Fuente: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. Función de transferencia. [en línea]. [citado 10 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/CControlC/materias/automatico/mdasc/ft3o.htm>

→ **Función de transferencia total de la planta (véase la ecuación 24):**

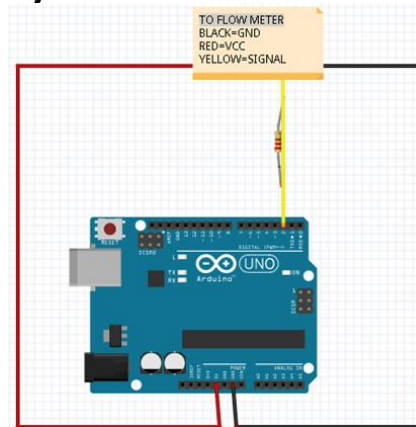
$$G_T(S) = \frac{3,085}{5213,7s^2 + 1238,17s + 33,617} \quad (24)$$

4.2. PROCEDIMIENTOS REALIZADOS Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO

4.2.1. Pruebas al sensor de flujo yf-s201 y bomba. El sensor posee tres cables: rojo (potencia), negro (a tierra) y amarillo (salida de impulsos). Al contar los pulsos de la salida del sensor, se logró establecer el movimiento del fluido y de este modo, poder hacer una respectiva calibración. Es necesario tener en cuenta que este no es un sensor de precisión, por lo que se encontraron variaciones de la frecuencia del pulso y que depende de la velocidad del flujo, la presión del fluido por medio de los tanques y la orientación del sensor.

La conexión establecida del sensor de flujo con el Arduino Mega2560, se realizó teniendo en cuenta la configuración que muestra la Figura 71:

Figura 71. Conexión sensor de flujo con Arduino



Fuente: Autores.

Una vez conectado el sensor de flujo a Arduino MEGA 2560, el siguiente paso consistió en realizar un programa para obtener los valores de flujo y evidenciarlos por el puerto serie. La función del código consistió en mostrar los litros que pasan por el sensor de flujo. Además, se midieron los pulsos que envía el sensor y se tomó el tiempo con un cronómetro (véase la Tabla 15).

Tabla 15. Muestras del sensor de flujo

Litros	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Promedios	
	Total Pulsos	Total x Litro	Total Pulsos	Total x Litro	Total Pulsos	Total x Litro	Total Pulsos	Total x Litro	Promedio Pulsos	Promedio x Litro
1	788	788	677	677	646	646	746	746	714,25	714,25
2	1600	812	1441	764	1400	754	1546	800	1496,75	782,5
3	2303	703	2200	759	2186	786	2292	746	2245,25	748,5
4	3094	791	3020	820	3063	877	3057	765	3058,5	813,25
5	3789	695	3800	780	3900	837	3866	809	3838,75	780,25

Fuente: Autores.

Las pruebas de funcionamiento de la planta fueron realizadas para determinar el comportamiento del equipo y sus componentes principales, como los sensores: flujo y ultrasónico; y actuador: bomba. A su vez, se diseñó una interfaz en LABVIEW 2016, donde se puede observar, analizar, modificar y evaluar el funcionamiento de la planta.

La bomba es la encargada de suministrar el caudal de entrada al tanque principal, determinando su tiempo de llenado. El objetivo de esta prueba es hallar el caudal de entrada, tomando el tiempo (véase la Tabla 16).

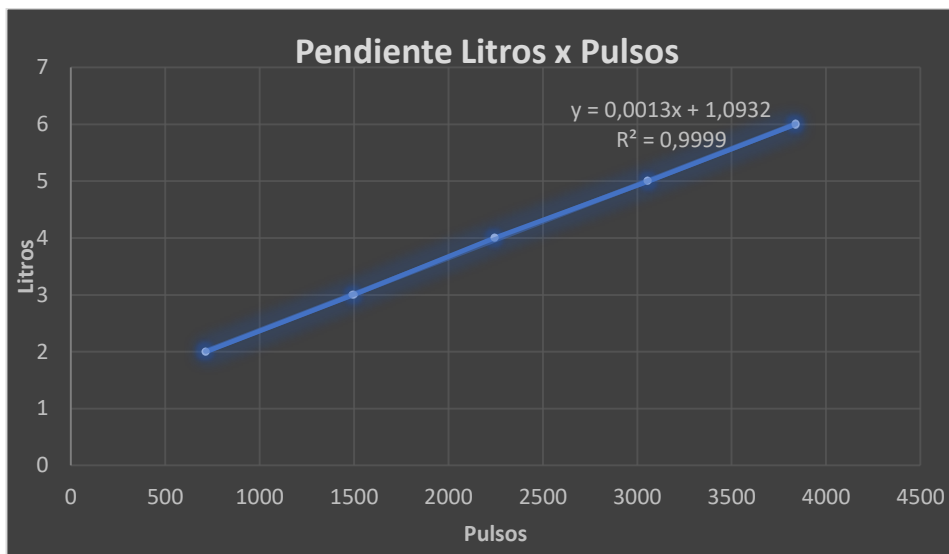
Tabla 16. Muestras de la bomba

7 volts			9 volts			11 volts		
LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)	LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)	LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)
1	38	1,57	1	30,6	1,96	1	25,4	2,36
1	38,7	1,55	1	30,4	1,97	1	26	2,30
1	39,2	1,53	1	30,6	1,96	1	26,5	2,26
1	36,5	1,64	1	30,3	1,98	1	26	2,30
1	38,7	1,55	1	30,5	1,96	1	24,7	2,42
8 volts			10 volts			12 volts		
LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)	LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)	LITROS (L)	Tiempo (s)	caudal (L/min)
1	32	1,87	1	27,4	2,18	1	22,1	2,71
1	34,3	1,74	1	28,4	2,11	1	25	2,4
1	34,3	1,74	1	27,1	2,21	1	24,1	2,48
1	34,3	1,74	1	28,4	2,11	1	24,5	2,44
1	34,6	1,73	1	28	2,14	1	24,7	2,42

Fuente: Autores.

Las Tablas 15 y 16 y las Figuras 72 y 73 muestran el tiempo de llenado en función de la altura en litros, se aprecia que el tiempo tiene un comportamiento lineal conforme aumenta la altura del agua, esto quiere decir que el tanque se va llenando con caudal constante a medida que pasa el tiempo.

Figura 72. Pendiente Litros por número de pulsos



Fuente: Autores.

Figura 73. Tiempo de llenado en litros



Fuente: Autores.

4.2.2. Pruebas sensor ultrasonido

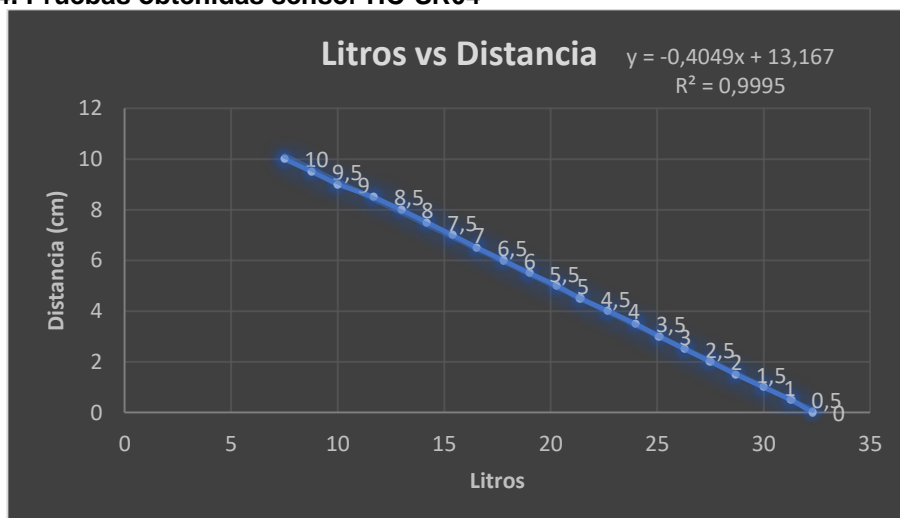
Con la ayuda de los datos obtenidos en la tabla 17, se realizó una gráfica del comportamiento del sensor (véase la Figura 74), donde se pudo evidenciar a cuantos centímetros equivale a un litro y así poder dar inicio al llenado del tanque.

Tabla 17. Caracterización sensor HC-SR04

Distancia (cm)	Litros (L)
7,5	10
8,8	9,5
10	9
11,7	8,5
13	8
14,2	7,5
15,4	7
16,55	6,5
17,8	6
19	5,5
20,3	5
21,4	4,5
22,7	4
24	3,5
25,1	3
26,3	2,5
27,5	2
28,7	1,5
30	1
31,3	0,5
32,3	0

Fuente: Autores.

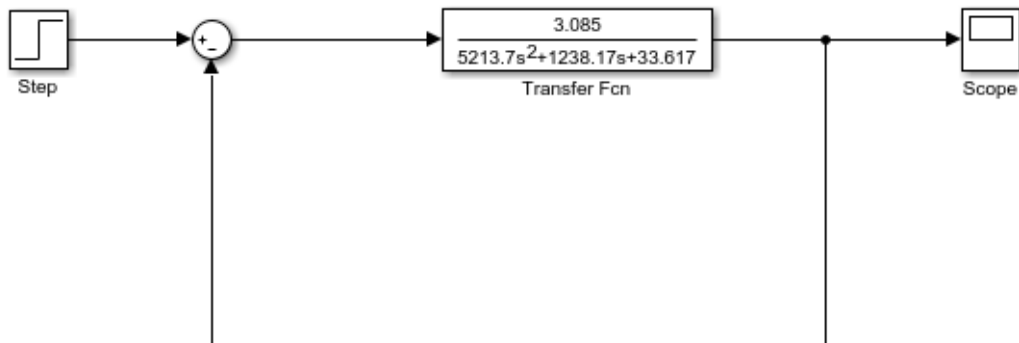
Figura 74. Pruebas obtenidas sensor HC-SR04



Fuente: Autores.

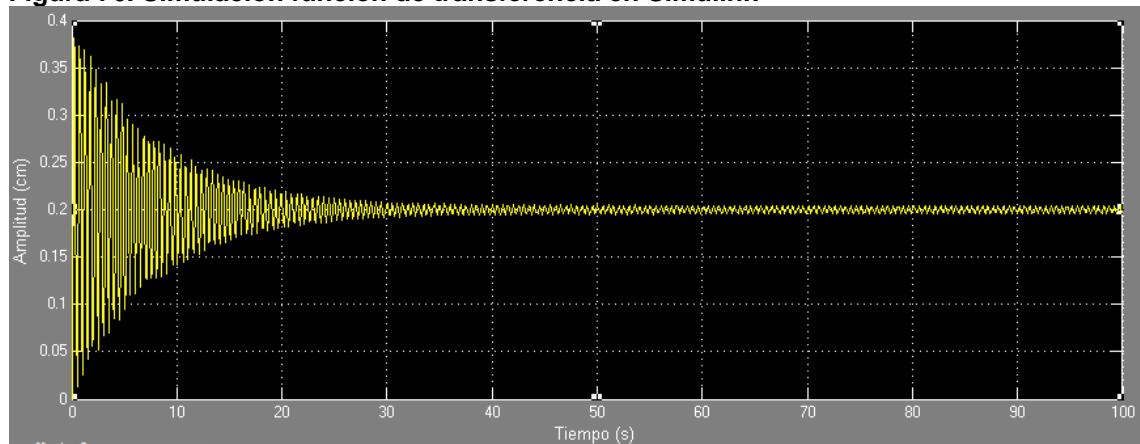
4.2.3. Simulación de la función de transferencia obtenida. Se usa la herramienta Simulink del software Matlab R2013a para obtener la respuesta de la función de transferencia total del sistema de tanques acoplados (véase las Figuras 75 y 76).

Figura 75. Simulación función de transferencia en Simulink Bloques



Fuente: Autores.

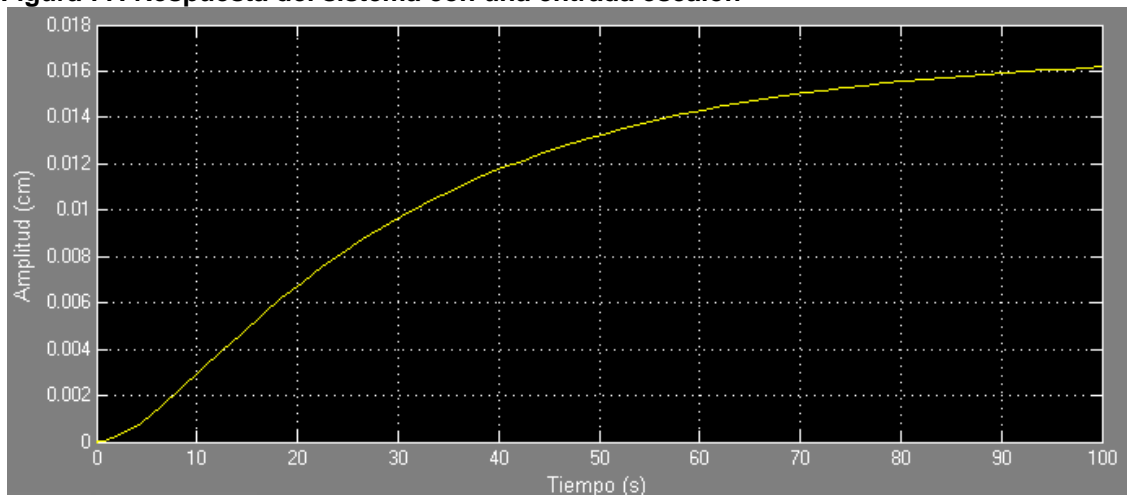
Figura 76. Simulación función de transferencia en Simulink



Fuente: Autores.

Para determinar la eficacia del modelo matemático propuesto para el sistema y de los valores de los parámetros obtenidos, se realizó una prueba en lazo abierto que consistió en aplicar una entrada de escalón al sistema (véase la Figura 77).

Figura 77. Respuesta del sistema con una entrada escalón



Fuente: Autores.

4.2.4. Diseño y simulación del controlador PID. Teniendo la función de transferencia total de la planta y con la ayuda de MATLAB R2013a, se hace un diseño de un controlador PID.

En primer lugar, se define la función de transferencia (véase la Figura 78) y como segunda medida se llama a la herramienta Sisotool de la versión de Matlab R2013a. Esta herramienta despliega en una misma ventana (véase la figura 79) los gráficos correspondientes al lugar de raíces y los diagramas de Bode para un sistema en lazo abierto. Mediante esta opción es posible diseñar un controlador que satisfaga los requerimientos especificados en la respuesta del lazo cerrado de control.

Los requerimientos que se le van agregar son:

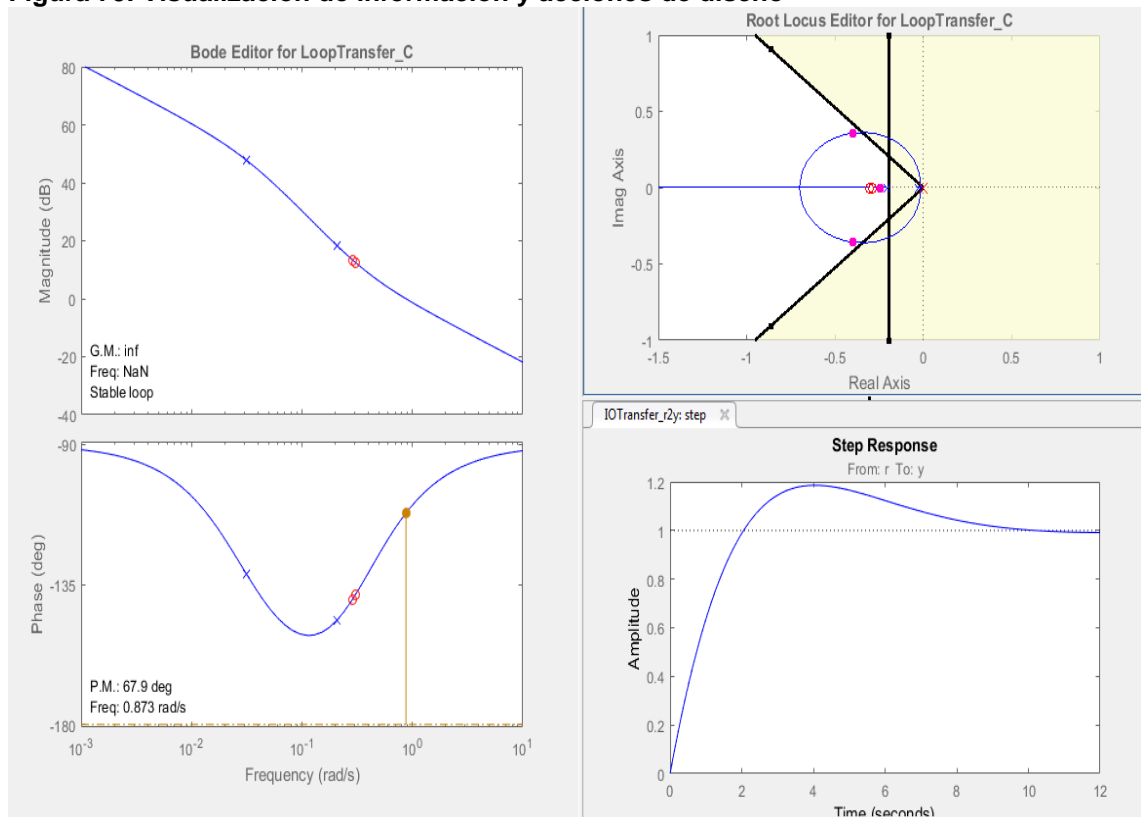
- Setting Time=20seg
- Percent Overshoot=5%

Figura 78. Código Matlab

```
Untitled.m x +
1 - s=tf('s')
2 - g=(3.085)/(5213.7*s^2+1238.17*s+33.617)
3 - sisotool(g)
4
```

Fuente: Autores.

Figura 79. Visualización de información y acciones de diseño



Fuente: Autores.

Esta herramienta muestra varias representaciones gráficas, que proporcionan diversos datos sobre el sistema bajo análisis. El diseño con Sisotool consistirá típicamente en realzar modificaciones sobre el controlador $C(s)$, a través de las representaciones gráficas (Bode y lugar de las raíces). Hasta cumplir las especificaciones de diseño.

Después de realizar cada paso con la herramienta (toolkit – Sisotool), esta arroja la información de la Figura 80 y con base a la ecuación 25, se procede a determinar los coeficientes K_p , K_i y K_d .

$$\frac{1361,4(s^2 + 0,287s + 0,0874202)}{s}$$

$$1361,4s + 805,40424 + \frac{119,014}{s} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} K_p &= 805,40424 \\ K_i &= 119,014s^{-1} \\ K_d &= 1361,4s \end{aligned}$$

Figura 80. Respuesta del controlador mediante Toolkit (Sisotool)

```
Tunable Block
Name: C
Sample Time: 0
Value:
1361.4 (s+0.3046) (s+0.287)
-----
s
```

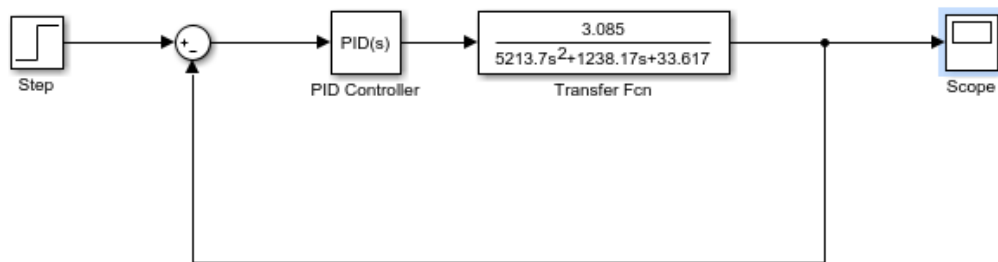
Fuente: Autores.

4.2.4.1. Simulación del Controlador PID con la planta.

Para una señal constante de 30 [cm] (véanse las Figuras 81 y 82) se observa que la salida responde adecuadamente a la referencia dada porque se estabiliza en 30 [cm], con una banda de error en estado estable del 0%, teniendo:

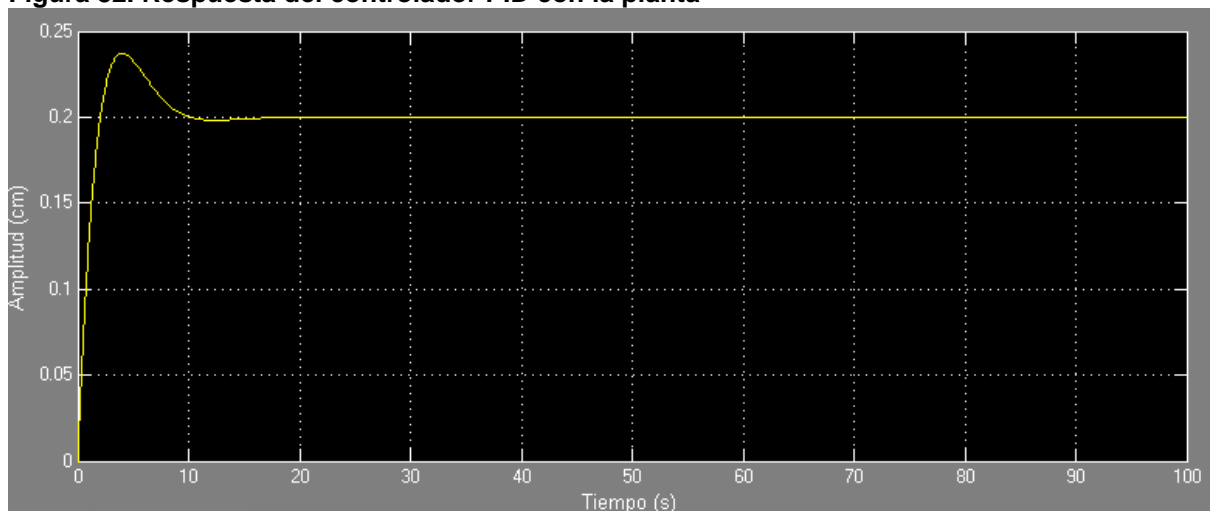
- $M_p = 5\%$
- $E_p = 0\%$

Figura 81. Simulación en Simulink PID



Fuente: Autores.

Figura 82. Respuesta del controlador PID con la planta



Fuente: Autores.

4.2.5. Prueba control en lazo cerrado - Control on/off. Por medio de la interfaz realizada en LabView 2016, se tienen dos variables de entrada: Umbral en Litros para el tanque 1 y Umbral en Litros para el tanque 2. Estos umbrales, establecen un límite de llenado o vaciado para controlar los tanques.

La prueba consistió en establecer el umbral del tanque 1 en 9 Litros y en el tanque 2, 7.5 Litros. Cuando el programa detectó que el primer tanque estaba en su estado inicial, se le dio apertura a la válvula central, llenado así el segundo tanque hasta llegar al umbral establecido. Luego, se abrió la válvula manual de salida para generar una perturbación al sistema. Ocasionando que la bomba quiera estabilizar la planta, debido a que, al realizar la apertura de la válvula de salida, el tanque 2 no se encuentra posicionado en el umbral requerido.

El sistema vuelve y activa la válvula para darle paso al agua hacia al tanque 2, bajando así el nivel del tanque 1 conforme se va llenando el tanque 2. Con la ayuda de los sensores de nivel se pudo observar la distancia del agua al irse llenando secuencialmente ambos tanques, esto permitió visualizar en la interfaz a cuántos centímetros de distancia está posicionado cada uno, así como también el número de litros obtenido en cada tanque, gracias a la caracterización de los sensores.

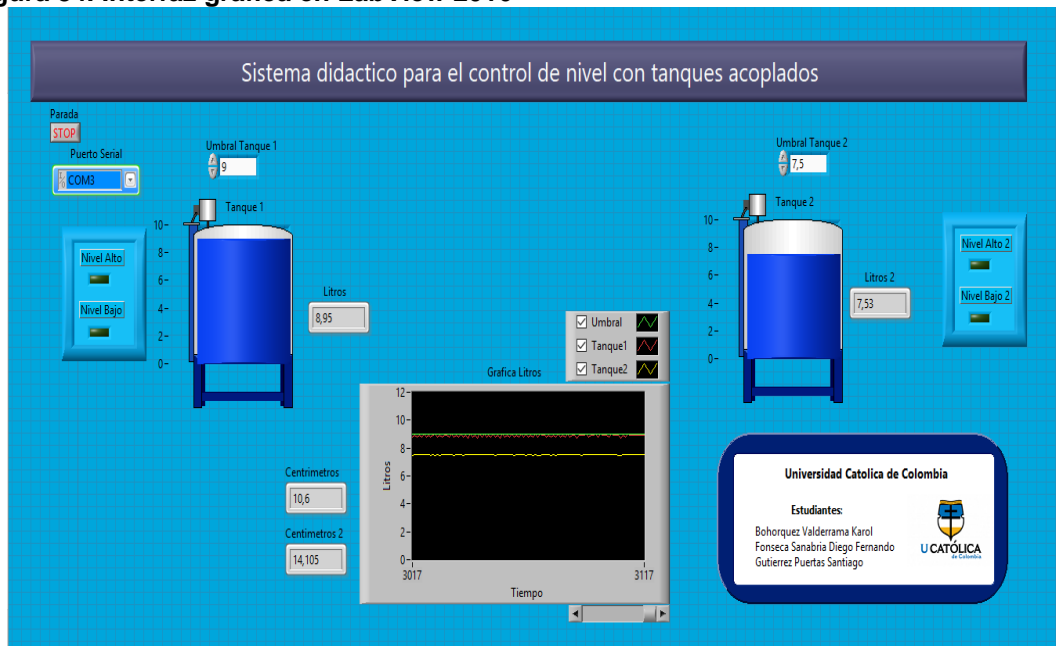
Además, la bomba va a estar succionando agua hasta que encuentre que el sistema ya está estabilizado como se puede ver en la Figura 83. El diseño de la interfaz gráfica se puede evidenciar en la Figura 84.

Figura 83. Visualización de los umbrales de cada tanque



Fuente: Autores.

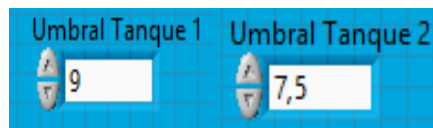
Figura 84. Interfaz gráfica en LabView 2016



Fuente: Autores.

4.2.6. Inicio de llenado. Para realizar el inicio del llenado al nivel deseado, se ejecuta el programa, se selecciona el nivel (umbral) deseado (véase la Figura 85), para darle activación a la bomba, el programa solo se encargará de mantener este nivel ingresado, haciendo operar la válvula ya sea abriendo o cerrando, para que el sistema se estabilice.

Figura 85. Ingreso de los umbrales deseados



Fuente: Autores.

Se puede apreciar la visualización en tiempo real del nivel de los tanques, también se tiene una pantalla tipo osciloscopio virtual para poder apreciar las señales del tanque 1 y tanque 2 en respuesta al tiempo que se tarda en llenar y estabilizarse el sistema como se pudo ver en la Figura 83.

5. DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

A continuación, se presenta una explicación detallada y organizada en lo que respecta al ítem de análisis económico que se proyecta en la ejecución de este trabajo de grado. Describiendo los costos de producción los cuales están constituidos por los siguientes elementos: materia prima, costos de insumos, visita técnica internacional y prototipo. Se considera que la inversión es un gasto a la creación de un prototipo funcional encaminado al ámbito académico.

Es importante destacar que en la tabla 18 se detalla la inversión realizada por cada uno de los autores de este trabajo de grado, en cuanto a la adquisición de todos los componentes y materiales necesarios para la elaboración de la planta.

Tabla 18. Descripción económica del proyecto

Inversión	Cantidad	Diego Fonseca	Karol Bohorquez	Santiago Gutiérrez	Total
VIAJE PANAMÁ	1	\$ 3,700,000.00	\$ 3,700,000.00	\$ 3,700,000.00	\$ 11,100,000.00
Tanques Acrílico 3mm	1	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00	\$ 450,000.00
Electrovalvula Industrial	1	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00	\$ 180,000.00
Flanches	10	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 60,000.00
Sensor de presión MPX5700DP	1	\$ 17,666.67	\$ 17,666.67	\$ 17,666.67	\$ 53,000.00
Sensores flujo	2	\$ 16,666.67	\$ 16,666.67	\$ 16,666.67	\$ 50,000.00
Bomba 12v	1	\$ 19,000.00	\$ 19,000.00	\$ 19,000.00	\$ 57,000.00
Transistor mosfet 9530	2	\$ 1,666.67	\$ 1,666.67	\$ 1,666.67	\$ 5,000.00
Borneras dobles	13	\$ 1,516.67	\$ 1,516.67	\$ 1,516.67	\$ 4,550.00
Condensadores	4	\$ 133.33	\$ 133.33	\$ 133.33	\$ 400.00
Reguladores 7805	1	\$ 233.33	\$ 233.33	\$ 233.33	\$ 700.00
Arduino Mega	1	\$ 21,666.67	\$ 21,666.67	\$ 21,666.67	\$ 65,000.00
Manguera 1/8	2m	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	\$ 3,000.00
Niple de 1/8 a 1/2	1	\$ 833.33	\$ 833.33	\$ 833.33	\$ 2,500.00
Válvulas manuales	4	\$ 6,666.67	\$ 6,666.67	\$ 6,666.67	\$ 20,000.00
Cable		\$ 3,333.33	\$ 3,333.33	\$ 3,333.33	\$ 10,000.00
Canaleta	3m	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00	\$ 15,000.00
Soldadura	2	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00	\$ 4,500.00
TODO PVC		\$ 12,433.33	\$ 12,433.33	\$ 12,433.33	\$ 37,300.00
PUNTA ESTRELLA	1	\$ 1,166.67	\$ 1,166.67	\$ 1,166.67	\$ 3,500.00
PISTOLA SIKAFLEX	1	\$ 3,666.67	\$ 3,666.67	\$ 3,666.67	\$ 11,000.00
TUBO SIKAFLEX	1	\$ 9,333.33	\$ 9,333.33	\$ 9,333.33	\$ 28,000.00
TUBO PVC 3 m	1	\$ 3,333.33	\$ 3,333.33	\$ 3,333.33	\$ 10,000.00
Cegueta	1	\$ 1,666.67	\$ 1,666.67	\$ 1,666.67	\$ 5,000.00
Teflón	2	\$ 500.00	\$ 500.00	\$ 500.00	\$ 1,500.00
Total individual		\$ 4,058,983.33	\$ 4,058,983.33	\$ 4,058,983.33	\$ 12,176,950.00

Fuente: Autores.

6. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y elaborar un sistema didáctico para control de nivel en tanques acoplados con sensores, actuadores y materiales con referencias existentes en el mercado que facilitaron el diseño mecánico del sistema, donde se pudo explorar diversas formas para lograr este prototipo y crear una experiencia lo más cercana posible al sector industrial.

Gracias a la implementación de la interfaz gráfica realizada en LabView 2016 se logró adaptar un juego de tanques a un sistema didáctico que servirá para realizar diferentes prácticas de laboratorio de control automático, vinculando las capacidades y conocimientos que conforman una gran oportunidad para fomentar la innovación y el crecimiento tecnológico en la academia, permitiendo realizar diversas pruebas donde los estudiantes las puedan poner en práctica fácilmente determinando lo que están haciendo, entendiendo el concepto de control y la gran importancia que tiene en la industria.

Para el desarrollo de prácticas de laboratorio de esta índole se pudo determinar que el conocimiento sobre tecnología existente aporta las herramientas para experimentar, descartar y optimizar los diferentes conceptos que surgen al momento de hacer la implementación de un sistema de control, que permiten identificar y debatir acerca de las distintas pruebas realizadas en la planta de control. Logrando crear una perspectiva de grandes desafíos que despierten el interés no sólo en la industria, sino en la academia para adaptar y transformar procesos de control, con el fin de impulsar a todos los actores involucrados, a que se vinculen en este desarrollo tecnológico e industrial para finalmente adquirir nuevos conocimientos en el área y aplicarlos en el ámbito laboral real.

La realización de la Visita Técnica Internacional al Canal de Panamá contribuyó a la apropiación de ideas acerca del funcionamiento de las esclusas y de cada uno de los sistemas de control que se implementan allí. Además, la recopilación y estructuración de una fuente de información confiable de consulta fue posible gracias al seguimiento de la agenda planteada, en donde fue posible evidenciar cada una de las innovaciones y avances tecnológicos en materia de ingeniería.

Posteriormente, se logró aplicar todo el conocimiento adquirido en la implementación final del prototipo para el sistema de tanques acoplados y la documentación de cada uno de los procesos para su consecución final.

7. RECOMENDACIONES

Con el fin de proponer un sistema que se encuentre dispuesto a mejoras mediante futuras pruebas o como base para el desarrollo de un nuevo prototipo, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El tanque reservorio debe estar ubicado de manera independiente a los tanques 1 y 2, con el fin de facilitar su transporte y movilización. Además, se debe tener en cuenta que, si la materia base de fabricación es acrílico, su espesor tendría que ser de 5 mm como mínimo.
- Para mejorar el sistema de control y las prácticas a implementar, se propone instalar una electroválvula solenoide similar a la que se utilizó para realizar la conexión entre los tanques 1 y 2, la cual se ubicaría en el tanque de salida, con el fin de obtener un control automático independiente sin necesidad de manipulación manual.
- En la implementación del prototipo propuesto se emplearon sensores y actuadores a escala, teniendo como referencia los utilizados de manera industrial. Sin embargo, para obtener mejores resultados y en aras de promover mejoras, se recomienda utilizar sensores de tipo industrial: sensores ultrasónicos 873P de salida analógica para medir el nivel en cada uno de los tanques, y sensores de flujo de agua G1.25 que funcionan de 1 a 120 lt/min, permitiendo mediciones con mayor precisión.
- La bomba DC empleada en este prototipo cuenta con la característica de ser de baja presión. Se recomienda utilizar una bomba de mayor potencia, debido a que su funcionamiento requeriría de presión media-alta, obteniendo de esta manera un aumento considerable de caudal a la entrada de los tanques acoplados.
- Elaborar prácticas de control diferentes a las entregadas con el prototipo actual, esto con el fin de promover la investigación de diversos sistemas de control que se pueden aplicar.
- Para que la operación de drenado de los tanques sea más eficiente, se sugiere crear un sistema de desagüe en el nivel mínimo de los tanques 1 y 2 para permitir un drenaje total del fluido contenido allí.
- Con el fin de promover la conservación de los tanques y cada uno de los elementos que los componen, se recomienda hacer actividades de mantenimiento preventivo después de cada uso. Además, se sugiere no dejar con agua los tanques durante un periodo mayor a dos (2) días, debido a que, gracias a la presión del agua, se presentan fugas en las uniones de las tuberías y en los flanches, haciendo que en el interior de los tanques se evidencie desgaste, deteriorando el prototipo y haciendo que los instrumentos de operación, a causa de esa humedad experimenten fallas eléctricas y de medición.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, A.C. CASTRO, O. C. OBANDO, F. F. Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes. Bogotá, Colombia. International Society of Automation, IV Automatisa, 2013.

ARANGO, Sandra. Desarrollo el sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. Medellín, Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). 2004.

BENITES, Diego. Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos. Quito, Ecuador. Escuela Politécnica Nacional. Facultad Escuela de Ingeniería. 1994, p. 11

BLOGINSTRUMENTACION.COM. (2017). ¿Cómo funciona un transmisor de presión? [en línea]. [citado 26 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2017/02/15/como-funciona-un-transmisor-de-presion/>>

CARLOS GAVIRIA. (2007). Modelado y simulación de un proceso de nivel [en línea]. Popayán. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad del Cauca. Disponible en Internet: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Teoria_Sistemas_Lineales/Archivos%20curso/MapleMatlab/Cap2/Ejemplo%20Modelo%20Nivel/control%20de%20nivel.pdf>

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Hidráulica de los canales abiertos. Applied Hydrology, McGraw-Hill International editions. 1988

CONTROL SYSTEMS PRINCIPLES. Sistemas de Depósitos Acoplados [en línea]. [citado 25 abril, 2017] Disponible en Internet: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/03CoupledTanksSP.pdf>>

CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ª edición. Marcombo S.A.; 1997.

FABREGAS, Ernesto. FARIAS, Gonzalo. DORMIDO, Sebastián. ESQUEMBRE, Francisco. Developing a remote laboratory for engineering education. Computers & Education. ISSN 0360-1215, Elsevier. (2011). Volumen 57, Issue 2, pp 1686-1697

FESTO DIDACTIC. FluidSIM Neumática Manual de usuario [en línea]. Denkendorf, Alemania. [citado 15 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/723058_fl_sim_p42_es_offset.pdf>

G. CASTELO. (2011). Ajuste, configuración y control de cuatro tanques acoplados [en línea]. Montería. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad de Córdoba. Disponible en Internet: <<http://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIX/pdf/203.pdf>>

GIRALDO, Indira. Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y arquitectura posgrado en automatización industrial. Trabajo de grado (maestría). 2004

HARIVIGNESH, A. System Identification and Design of controllers For a Hybrid Tank System. Madurai, India. K.L.N. College of Engineering. IEEE International Conference on Innovations in Engineering and Technology, 2014, p. 2

JOHN ALEXANDER VARGAS LOZADA, ALEJANDRO MARULANDA GRAJALES. (2010). Control y medida de nivel de líquido por medio de un sensor de presión diferencial [en línea] Pereira. [citado 15 octubre, 2017]. Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en Internet: <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1772/6298A696.pdf?sequence=1>>

KHALID, Muhammad. KADRI, Muhammad. Liquid Level Control of Nonlinear Coupled Tanks System using Linear Model Predictive Control. Islamabad, Pakistan. Emerging technologies (ICET), 2012.

LEYES, Jennifer. NAVARRETE, Darío. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabView. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Trabajo de grado (Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica y Automatización Industrial). 2007, p.10

LUIS ACEBES. (2002) Sistemas de control. [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf>

LYCOS. Sistemas de control -lazo abierto- lazo cerrado [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.academia.edu/7885227/Sistemas_de_control_-_lazo_abierto_-_lazo_cerrado>

MARIO ALBERTO PÉREZ. (2008) Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>

MI CANAL DE PANAMÁ. Avances de la ampliación [en línea]. Ciudad: Panamá. El Faro [citado 15 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2016/01/elfaro-20160101.pdf>>

NEITA, Lidia. PRADA, Ricardo. Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (totally integrated automation) y adaptación de un proceso industrial para el desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) Disponible base de datos biblioteca UIS trabajos de grado. 2008

PEÑARANDA, Claudia. SILVA, Wilson. GÓMEZ, Eulices. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Trabajo de grado (ingeniero electrónico) - (ingeniero electricista). 2014

PETER SAUL GUTARRA CASTILLO. (2011). Modelación y control de un sistema de tanques acoplados [en línea]. Perú. [citado 15 de octubre, 2017]. Universidad de Piura. Disponible en Internet:

<<http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/CONCYTEC/232/1/Tesis%20-%20Gutarra%20Castillo%20Peter%20Sa%C3%BAI.pdf>>

PROCESS CONTROL EDUCATION. Multivariable Control [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://pc-education.mcmaster.ca/Textbook%20WEB%20book%20with%20updates/Marlin-Part%20V.pdf>>

REDULA. Medición de flujo de fluidos. [en línea]. [citado 25 abril, 2017] Disponible en Internet: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosDictados/web%20instrumentacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/libro%20pdf/CAP%204%20Medicion_flujo_2009.pdf>

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. Proc. R. Soc. London. 1883. 35: 84-99.

SCIENCE DIRECT. A. I. LUR'E. V. N. POSTNIKOV. On the theory of stability of control systems, Applied mathematics and mechanics Control Systems [en línea]. [citado 25 abril, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-applied-mathematics-and-mechanics/vol/26/issue/1>>

SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO. Séptima Edición. Prentice Hall. Benjamín Kuo, Biblioteca UDB, Clasificación: 621.3811 K95 1996

STINGA, Florin. SOIMU, Andreea. Hybrid Modelling and control for a two-tank system. Craiova, Rumania. University of Craiova, 2010.

TANSLEY, Claire E.; MARSHALL, David P. Flow past a Cylinder on a Plane, with Application to Gulf Stream Separation and the Antarctic Circumpolar Current. Journal of Physical Oceanography. 2001

TecQuipment Ltd. Coupled Tanks Apparatus. Catálogo CE105/CE105MV

VICTOR MANUEL CADENA. (2005). Construcción y modelación de un sistema de control de nivel de líquidos [en línea]. [citado 15 octubre, 2017]. Escuela Politécnica. Disponible en Internet: <<http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel2.pdf>>

ANEXOS

MANUAL DE USO

El presente manual de uso se desarrolla con el fin de dar a conocer las respectivas conexiones entre el Arduino Mega 2560 y los sensores y actuadores que operan en el sistema de tanques. Este prototipo de tanques acoplados consta de tres (3) unidades: uno reservorio, que por sus dimensiones y volumen permiten el almacenamiento de la totalidad de agua que se va a utilizar en la práctica, y los otros dos (2) tanques de dimensiones idénticas son los encargados de que los procedimientos de control que se llevan a cabo en el sistema se realicen de manera efectiva, y además se dan a conocer todos los elementos que conforman esta planta.

Además, se considera importante e indispensable conocer las indicaciones y normas de seguridad básicas para garantizar una utilización segura y exenta de fallas durante la puesta en marcha del sistema. En cuanto al usuario, se genera un compromiso de responsabilidad en el momento del uso y manipulación del sistema didáctico de tanques acoplados, mediante de un control regulado en lo referente a las normas de seguridad y prevenir accidentes que podrían causar daños tanto al usuario como a los elementos que contiene la planta.

INDICACIONES DE SEGURIDAD

- **Generales:**

Para la manipulación y puesta en marcha de la planta, únicamente se podrá realizar en presencia y bajo supervisión de un monitor o docente responsable. Todos los componentes y materiales utilizados en el sistema deben estar debidamente identificados de modo tal que se asegure el registro de estos y se evite confusiones al momento de establecer conexiones minimizando el riesgo de ocurrencia de algún problema.

Solamente se puede establecer las conexiones eléctricas y de sensores cuando estas se encuentren desconectadas de la corriente eléctrica en el sistema didáctico de tanques acoplados. Además se debe asegurar la conexión a la red eléctrica mediante un dispositivo como un interruptor on/off.

Se establece un rango de baja tensión máximo de 12 VDC. No obstante, al utilizar la conexión que requiere 120 VAC sólo se podrá realizar por una persona capacitada y calificada para tal fin.

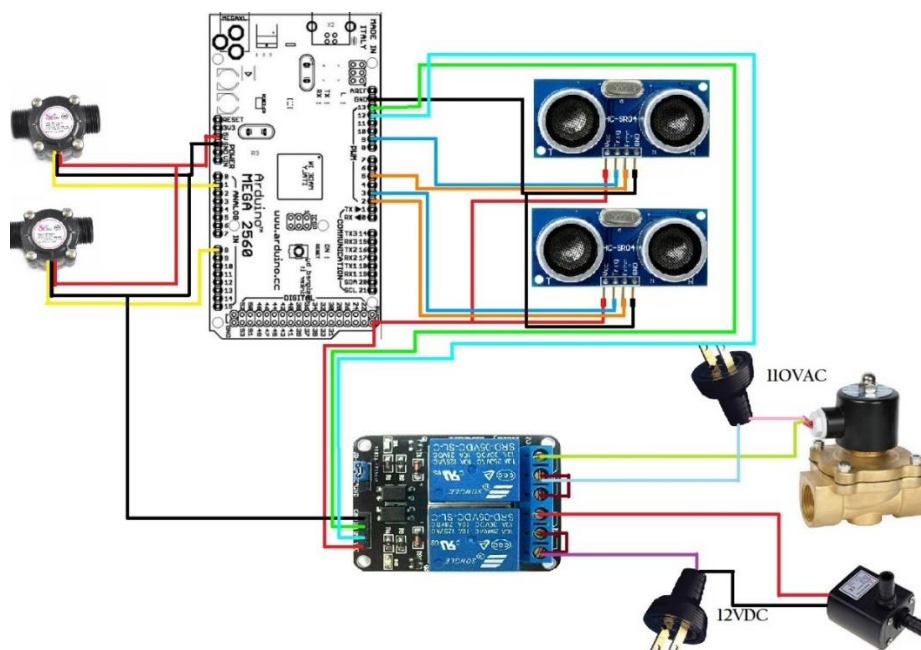
En el momento de efectuar el montaje de todos los componentes del sistema se debe garantizar que estos queden instalados de modo fijo para prevenir accidentes mecánicos. A su vez como medida de seguridad únicamente, se permite el acceso y/o manipulación de los componentes del sistema si este no está en funcionamiento.

Se recomienda hacer uso de agua potable limpia evitando el uso de agua salada, líquidos sucios o viscosos, para garantizar que la bomba funcione durante más tiempo sin requerir un trabajo de mantenimiento, también tener en cuenta que esta bomba no deberá operar en vacío.

- **Conexiones Eléctricas**

Las conexiones eléctricas deben ir distribuidas de tal manera que se pueda identificar las entradas analógicas y las entradas digitales del sistema, además de las conexiones en el módulo relé, que son las encargadas de poder realizar la activación de la electroválvula y la bomba. Para ello se ilustra a continuación un diagrama del cableado entre los pines y los componentes (vease figura 86):

Figura 86. Diagrama de conexiones



Fuente: Autores.

De una manera más explícita para la comprensión de las conexiones y actuadores que conforman el diagrama del cableado ilustrado en la figura 86 se realiza una identificación de Pines con su respectiva señal descritos a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19. Distribución de pines

PIN	SEÑAL
A1 (Análogo)	SENSOR DE FLUJO 1
A8 (Análogo)	SENSOR DE FLUJO 2
A14 (Análogo)	PIN DE RESERVA
2 (Digital)	SENSOR ULTRASÓNICO T1
3(Digital)	TRIG ULTRASÓNICO T1
5(Digital)	SENSOR ULTRASÓNICO T2
9(Digital)	TRIG ULTRASÓNICO T2
12(Digital)	IN1 RELÉ ELÉCTROVAL
13(Digital)	IN2 RELÉ BOMBA

Fuente: Autores.

- **Indicaciones de inicio y finalización del proceso.**

Inicialmente se debe verificar el estado de las válvulas manuales, las cuales deben estar completamente cerradas, asimismo revisar que los tanques se encuentren limpios y sin ningún tipo de líquido en su interior. Además confirmar que las conexiones eléctricas se encuentren instaladas según el diagrama de la figura 87 para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y evitar inconsistencias en el software.

Al realizar la verificación anterior se procede a identificar en el tanque de reservorio el punto máximo de volumen de agua, que se encuentra señalado con una línea de referencia de color rojo y comenzar el llenado de agua hasta dicho nivel.

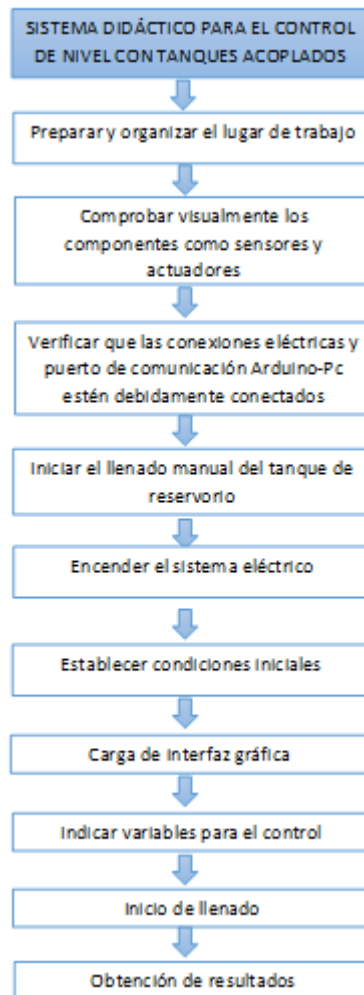
Para el suministro de energía de la bomba y la conexión de 110v se procede a encender la fuente para así activar el sistema y permitir que los dos (2) tanques queden con el nivel mínimo de agua requerido para que se pueda empezar con el funcionamiento de este sistema, para ello se debe indicar los parámetros en la interfaz que permiten colocar un umbral de cero (0) en cada tanque.

Al terminar los procedimientos anteriores se da vía libre para ejecutar las respectivas prácticas que se vayan a realizar en el sistema didáctico para control de tanques acoplados. Luego de hacer efectivas cada una de las sesiones y darlas por finalizadas se deben desocupar completamente los tanques y proceder al secado y limpieza de estos.

Finalmente se verifica que los tanques se encuentren sin ningún tipo de líquido y completamente limpios y se desconecta el sistema eléctrico.

Figura 87. Manual de uso

DIAGRAMA DE FLUJO MANUAL DE USO



Fuente: Autores

PRÁCTICA NO 1. ON-OFF

1. INTRODUCCIÓN

La salida del controlador ON-OFF, o de dos posiciones, solo puede cambiar entre dos valores al igual que dos estados de un interruptor. El controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada para un valor de referencia dado pues el controlador produce una continua desviación del valor de referencia. La acción del controlador de dos posiciones tiene un simple mecanismo de construcción, por esa razón este tipo de controladores es de los de más amplio uso, y comúnmente utilizados en sistemas de regulación de temperatura.

Los controladores mecánicos de dos posiciones normalmente poseen algo de histéresis, por el contrario, los controladores electrónicos usualmente funcionan sin histéresis. La histéresis está definida como la diferencia entre los tiempos de apagado y encendido del controlador. El usar un controlador de acción de dos posiciones da como resultado una oscilación de la variable controlada.⁵⁵

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Implementar un control on-off de nivel con aplicación directa en un tanque de proceso.

2.2. Objetivos específicos

- Implementar la técnica de control utilizando el sistema didáctico.
- Realizar la programación adecuada en la interfaz gráfica del proceso utilizando el software LabView 2016.
- Variar los niveles del umbral de cada uno de los tanques.

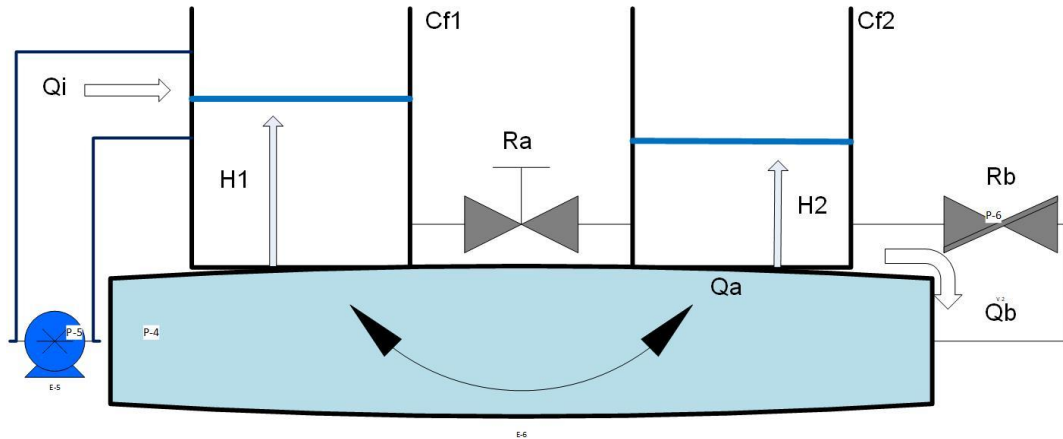
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- a. Seguir los pasos indicaos en el diagrama de flujo que se encuentra en el manual de uso de la planta.
- b. Cargar la interfaz de LabView como se indica en el apartado anterior.
- c. Ingresar variables requeridas para el sistema de control on-off (Valores umbrales $H1 > H2$) (Véase la figura 88).
- d. Tener válvulas manuales cerradas al momento del llenado de los tanques.
- e. Cuando el nivel de los tanques llegue a los umbrales asignados, se da apertura a la válvula de salida Rb (+/- 25°) (Véase la Figura 89).
- f. Observar las gráficas que se evidencian en la interfaz de LabView.

⁵⁵ SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO. Séptima Edición. Prentice Hall. Benjamín Kuo, Biblioteca UDB, Clasificación: 621.3811 K95 1996

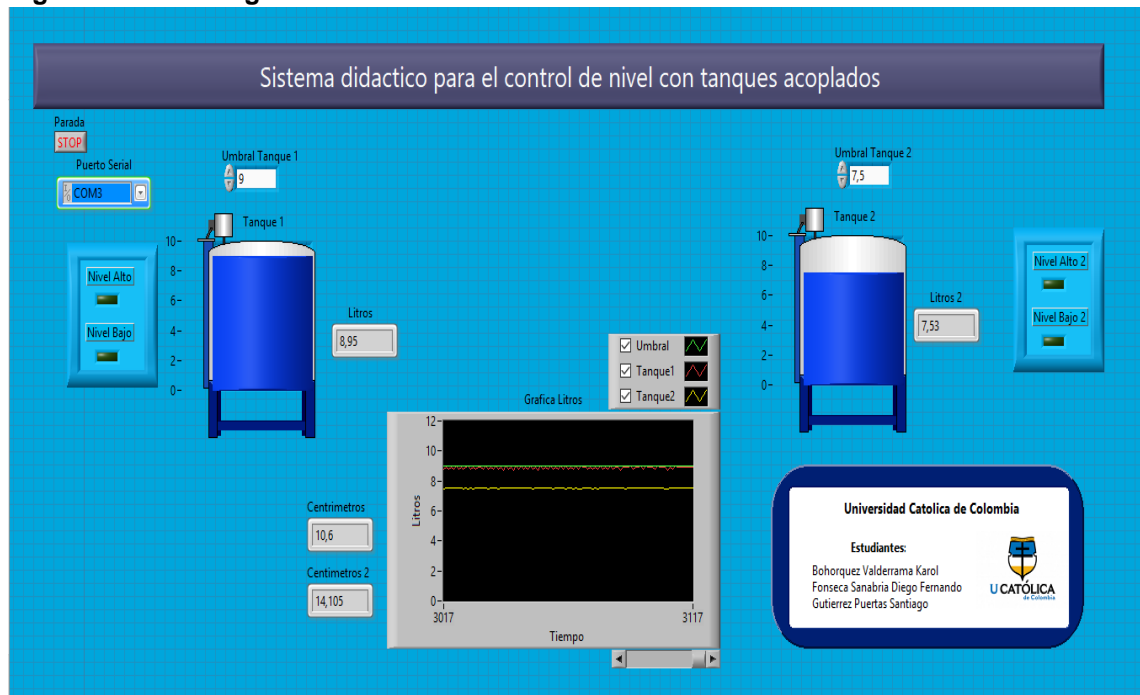
g. Hacer este procedimiento con 4 valores diferentes de umbral.

Figura 88. Sistema de tanques acoplados.



Fuente: Autores.

Figura 89. Interfaz gráfica en LabView 2016.



Fuente: Autores.

4. BIBLIOGRAFIA PRÁCTICA No.1

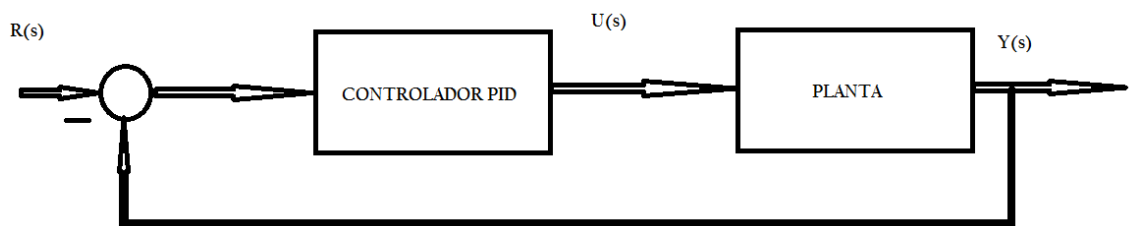
[38] SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO. Séptima Edición. Prentice Hall. Benjamín Kuo, Biblioteca UDB, Clasificación: 621.3811 K95 1996

ANEXO A3. PRÁCTICA NO 2. IMPLEMENTAR Y ANALIZAR CONTROLADOR PID

1. Introducción

En esta práctica se tendrá que realizar una implementación con el controlador PID, que es un mecanismo de realimentación donde se tienen tres parámetros principales: proporcional, integral y el derivativo, El proporcional depende del error, el integral de errores anteriores y el derivativo es una predicción de los errores que tendrá el sistema (véase Figura 90).

Figura 90. Diagrama de bloques controlador PID



Fuente: Autores.

2. Objetivos

2.1. General

Implementar un controlador PID, con aplicación directa en un tanque de proceso.

2.2. Específicos

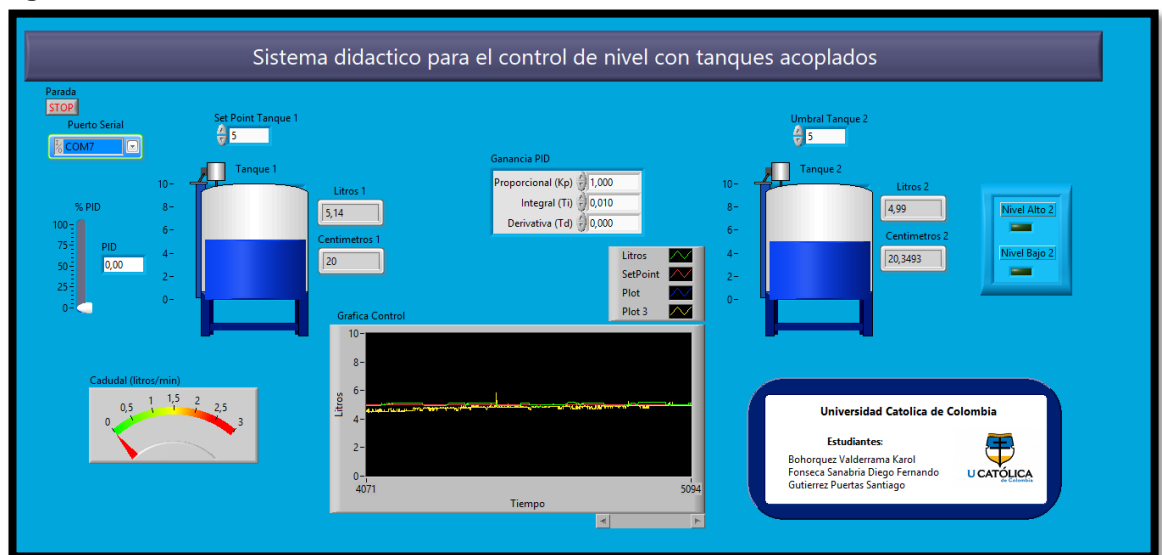
- Diseñar el controlador PID teniendo como base la función de transferencia total del sistema.
- Implementar la técnica de control utilizando el sistema didáctico.
- Realizar la programación adecuada en la interfaz gráfica del proceso utilizando el software LabView2016.

3. Procedimiento experimental

- a. Seguir los pasos indicados en el diagrama de flujo que se encuentra en el manual de uso de la planta.
- b. Cargar la interfaz de LabView 2016 como se indica en el apartado anterior.
- c. Ingresar los umbrales deseados a la interfaz de LabView, teniendo en cuenta que $H1$ debe ser siempre mayor a $H2$. (Véase figura 91)

- d. Teniendo las constantes de K_p , K_i y K_d , tener en cuenta que la interfaz solo recibe la constante de proporcional y de integral y derivativo los recibe en tiempo.
- e. Tener válvulas manuales cerradas al momento del llenado de los tanques.
- f. Observar el comportamiento de las gráficas que se evidencian en la interfaz de LabView 2016.
- g. Anotar los datos esperados, y lo analizado en el comportamiento de la planta.

Figura 91. Interfaz LabView controlador PID.



Fuente: Autores.