

**INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE TANQUES
RECTANGULARES PARA REALIZAR EL CONTROL DE NIVEL EMPLEANDO EL
PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E**

**IMER ALBERTO ROBLES RODRÍGUEZ
JAVIER AUGUSTO GALVIS CHACÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018**

**INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE TANQUES
RECTANGULARES PARA REALIZAR EL CONTROL DE NIVEL EMPLEANDO EL
PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E**

**IMER ALBERTO ROBLES RODRÍGUEZ
JAVIER AUGUSTO GALVIS CHACÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director
Juan David Bastidas Rodríguez
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIAS

A mis padres Gilma y Tobías quienes siempre me apoyan.

A mi familia, que siempre me acompaña y me impulsa a no rendirme.

A todas las personas que conocí en esta etapa de mi vida, que me enseñan nuevas cosas cada día (y aún continúan aguantándome 😊).

~ Imer Alberto Robles Rodríguez

A mis padres Julio y Beatriz que lo han dado todo para el logro de mis metas.

A mi hermano César en su apoyo incondicional en el transcurso de este gran sueño.

A mi familia, que siempre me motivo a seguir adelante.

A mi compañero de proyecto Imer por su ánimo y entrega durante la ejecución de nuestro proyecto.

A mis amigos: Duvan, Luis, Andres, Jhonys, Oscar y demás compañeros de estudio, porque el aprendizaje también se consigue de los propios amigos.

Y a todas las personas que hicieron parte de esta etapa de mi vida, que me apoyaron cuando más lo necesitaba.

~ Javier Augusto Galvis Chacón

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestra fuerza espiritual. A nuestra familia por su apoyo incondicional.

A nuestro director de proyecto, el profesor Juan David Bastidas por su orientación,
esfuerzo y dedicación.

A los profesores Ricardo Alzate y David Forero por sus consejos y apoyo en la
realización del proyecto.

A los demás profesores por brindarnos sus conocimientos.

Y a todas aquellas personas que hicieron posible este trabajo.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 16 |
| 1.2. OBJETIVOS | 17 |
| 1.2.1. Objetivo general | 17 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 17 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA | 18 |
| 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA | 19 |
| 2.1.1. Sistema de tanques | 19 |
| 2.1.2. Tablero de control | 20 |
| 2.1.2.1. Controlador Lógico Programable (PLC) | 21 |
| 2.1.3. Válvula ON/OFF | 22 |
| 2.1.4. Válvula Proporcional | 23 |
| 2.1.5. Bomba sumergible | 24 |
| 2.1.6. Sensor de nivel | 25 |
| 2.1.7. Bomba de agua MINI SMART AQUA PAK | 28 |
| 2.2. DISEÑO INICIAL | 30 |
| 2.3. MONTAJE | 30 |
| 2.3.1. Montaje planta | 31 |
| 2.4. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL 1 | 31 |
| 2.5. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL 2 | 32 |
| 2.6. MONTAJE PLC | 33 |
| 2.7. CABLEADO DE ALIMENTACIÓN | 34 |
| 2.7.1. Cableado de Entradas y Salidas | 35 |
| 2.8. CONDICIONES DE OPERACIÓN | 39 |
| 2.8.1. Condiciones para la bomba de agua | 39 |
| 2.8.2. Condiciones para la válvula proporcional | 40 |
| 3. IDENTIFICACIÓN DE MODELO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS | 41 |
| 3.1. SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO | 42 |
| 3.1.1. Resistencia hidráulica | 42 |
| 3.1.2. Capacitancia hidráulica | 43 |
| 3.2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA | 44 |
| 3.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS | 46 |
| 3.3.1. Capacitancia | 46 |
| 3.3.2. Resistencia hidráulica | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 4. SISTEMA DE CONTROL | 48 |
| 4.1. CONTROL DE NIVEL EN EL TANQUE 1 | 49 |
| 4.1.1. Reglas de Ziegler-Nichols | 50 |
| | |
| 5. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR EN PLC | 55 |
| 5.1. CONSIDERACIONES | 56 |
| 5.1.1. Error de cuantización | 56 |
| 5.1.2. Conversión de la señal de entrada | 57 |
| 5.1.3. Variables | 57 |
| 5.1.4. Bloque escalamiento | 59 |
| 5.1.5. Bloque PID | 59 |
| 5.2. PROTOCOLO DE OPERACIÓN | 59 |
| 5.3. RUTINAS | 60 |
| 5.4. VERIFICACIÓN DEL CONTROLADOR | 62 |
| | |
| 6. CONCLUSIONES | 63 |
| | |
| 7. RECOMENDACIONES | 64 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura1. Sistema general | 19 |
| Figura2. Sistema de tanques | 20 |
| Figura3. Tablero de control | 21 |
| Figura4. PLC Allen-Bradley | 22 |
| Figura5. Válvula on/off | 22 |
| Figura6. Válvula proporcional | 23 |
| Figura7. Bomba de agua sumergible | 24 |
| Figura8. Sensor de proximidad | 25 |
| Figura9. Salida sensor de proximidad | 27 |
| Figura10. Caja para sensor de nivel | 28 |
| Figura11. Bomba de agua MINI SMART | 29 |
| Figura12. Topología planteada | 30 |
| Figura13. Topología modificada | 32 |
| Figura14. Topología final | 33 |
| Figura15. Tablero de control fijo en la pared | 34 |
| Figura16. Regulador de tensión LM7508 | 35 |
| Figura17. Circuito de activación de elementos Vac | 35 |
| Figura18. Caja de distribución | 36 |
| Figura19. Montaje final del sistema | 37 |
| Figura20. Arreglo de tuberías | 38 |
| Figura21. Diagrama P&ID de la planta | 39 |
| Figura22. Curva de rendimiento de la bomba | 40 |
| Figura23. Flujo volumétrico | 41 |
| | |
| Figura24. Sistema de nivel de líquidos | 44 |
| Figura25. Apertura de la válvula manual | 47 |
| Figura26. Respuesta al escalón del sistema | 47 |
| | |
| Figura27. Control PID en una planta | 49 |
| Figura28. Respuesta al escalón en forma de S | 50 |
| Figura29. Respuesta al escalón en el Tanque 1 | 51 |
| Figura30. Validación del modelo propuesto | 53 |
| Figura31. Respuesta de la planta con controlador | 54 |
| Figura32. Respuesta de la planta con controlador sintonizado | 55 |
| | |
| Figura33. Descripción de la rutina principal | 61 |
| Figura34. Rutina de desagüe | 62 |
| Figura35. Controlador implementado en PLC | 63 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Características válvula on/off | 23 |
| Tabla 2. Características válvula proporcional | 24 |
| Tabla 3. Características bomba de agua sumergible | 25 |
| Tabla 4. Especificaciones técnicas del sensor de proximidad | 26 |
| Tabla 5. Pines del sensor de proximidad | 26 |
| Tabla 6. Características bomba Mini Smart | 29 |
| Tabla 7. Capacitancia de los tanques | 46 |
| Tabla 8. Valores de τ | 48 |
| Tabla 9. Regla de Ziegler-Nichols basado en la respuesta al escalón | 51 |
| Tabla 10. Parámetros del controlador | 54 |
| Tabla 11. Parámetros del controlador sintonizado | 55 |
| Tabla 12. Palabra de entrada módulo analógico | 56 |
| Tabla 13. Datos de entrada módulo analógico | 57 |
| Tabla 14. Variables de entrada | 58 |
| Tabla 15. Variables de salida | 58 |
| Tabla 16. Variables locales destacadas | 58 |

RESUMEN

TÍTULO: INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE TANQUES RECTANGULARES PARA REALIZAR EL CONTROL DE NIVEL EMPLEANDO EL PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E¹

AUTORES: IMER ALBERTO ROBLES RODRÍGUEZ
JAVIER AUGUSTO GALVIS CHACÓN²

PALABRAS CLAVE: Control PID, instrumentación industrial, PLC ALLEN BRADLEY, sistema de nivel de líquidos, modelo matemático para nivel de agua en tanques.

DESCRIPCIÓN:

La falta de bancos de pruebas suficientes para las asignaturas de automatización y control, impide una adecuada formación complementaria de los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Industrial de Santander. Por ello se presenta el siguiente trabajo de grado, el cuál aborda, la instrumentación, caracterización, programación y montaje del control de nivel de líquido, en un sistema de tanques rectangulares, empleando un PLC ALLEN-BRADLEY. El sistema se realiza a partir de algunos elementos almacenados en el laboratorio y un conjunto de tanques donado a este mismo. Se desarrolla una topología especial que permite crear un lazo de recirculación de líquido, utilizando tubería de PVC y dispositivos eléctricos como válvulas del tipo on/off, una bomba de agua, una válvula proporcional, junto con un sistema de sensores de ultrasonido. A partir de cálculos matemáticos, se obtienen los parámetros del sistema representados por resistencias y capacitancias hidráulicas, con estos parámetros se encuentra la función de transferencia del sistema. El modelo del conjunto se valida experimentalmente a partir de una respuesta al escalón. Con este, se sintonizan los parámetros para un controlador PID empleando el primer método de Ziegler & Nichols. Mediante una rutina lógica programada en lenguaje de escalera, se implementa el control PID en el PLC ALLEN-BRADLEY, cuya salida controla la válvula proporcional. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del control PID. El funcionamiento del sistema es adecuado para realizar pruebas que complementen la formación académica de estudiantes.

¹Trabajo de grado

²Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Juan David Bastidas Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: INSTRUMENTATION AND COMMISSIONING OF A RECTANGULAR TANK SYSTEM TO PERFORM THE LEVEL CONTROL USING THE PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E³

AUTHORS: IMER ALBERTO ROBLES RODRÍGUEZ
JAVIER AUGUSTO GALVIS CHACÓN⁴

KEYWORDS: PID Control, industrial instrumentation, ALLEN BRADLEY PLC, liquid level system, mathematical model for water level in tanks

DESCRIPTION:

The lack of sufficient test benches for the automation and control subjects, prevents an adequate complementary training of the students of electronic engineering of the Industrial University of Santander. Therefore, the following degree work is presented, which deals with the instrumentation, characterization, programming and assembly of the liquid level control in a rectangular tank system using an ALLEN-BRADLEY PLC. The system is made from some elements stored in the laboratory and a set of tanks donated to it. A special topology is developed to create a fluid recirculating loop, using PVC pipe and electrical devices such as on/off valves, a water pump, a proportional valve, along with an ultrasound sensor system. From mathematical calculations, the parameters of the system represented by hydraulic resistances and capacitances are obtained, with these parameters the function of transference of the system is found. The whole model is experimentally validated from a stepresponse. With this, the parameters are tuned for a PID controller using the first Ziegler & Nichols method. Using a logic routine programmed in ladder language, the PID control is implemented in the ALLEN-BRADLEY PLC, whose output controls the proportional valve. The results obtained demonstrate the effectiveness of PID control. The functioning of the system is suitable for conducting tests that complement the academic formation of students

³Bachelor Thesis

⁴Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Juan David Bastidas Rodríguez

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sector de la automatización ha logrado un desarrollo imprescindible, en el campo de los procesos industriales, las mejoras se hacen una tarea del día a día. Un ejemplo claro, se observa en las plantas encargadas de producir alimentos empacados para el consumidor o en las dadas a la creación de productos de elementos para el aseo personal.

Cuando se habla de automatización, se refiere a un campo que abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores, los transmisores, los sistemas de control, los sistemas de supervisión y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar procesos industriales. Algunas empresas se han destacado por ser pioneras en la creación de productos y servicios en este campo, citando algunas: Siemens AG, Rockwell Automation, Honeywell, ABB y Scheider Electric, entre otras.

La elaboración de los instrumentos presentes en la automatización se realiza de acuerdo a las especificaciones del campo a actuar, ejemplos de los mismos son: la industria de alimentos, Oil & Gas, minería, metalmecánica, etc., lo anterior provoca que, los costos para adquirirlos se encuentren acorde con el presupuesto que manejan las empresas. Sin embargo, respecto a los mismos, para las instituciones educativas pueden ser muy elevados, aunque los proveedores de tecnología ofrecen descuentos especiales para universidades, aún siguen siendo cantidades que no son fáciles de obtener en el sistema educativo colombiano, y en general latinoamericano. Como consecuencia de ello, se han generado algunas iniciativas que buscan la creación de laboratorios de bajo costo para universidades. En particular, es conveniente hacer referencia al trabajo del profesor Kevin Passino en la Universidad Estatal de Ohio – Estados Unidos, a través de su programa weLAB: Low-Cost Engineering Laboratory Project (<https://welab.engineering.osu.edu/>).

La Universidad Industrial de Santander en su proceso de mejoramiento a la calidad académica y contribuir a la formación de los estudiantes del programa de Ingeniería electrónica, ha optado en realizar inversiones, para adquirir diferentes dispositivos de automatización (controladores lógicos programables, sensores, entre otros) de algunas compañías como Siemens AG y Rocwell Automation. Por ello, los profesores de la escuela de eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones se han puesto en la tarea de encontrar estudiantes dispuestos a desarrollar bancos enfocados a la realización de pruebas, a

partir del uso de los elementos anteriores. Cumpliendo esta meta se plantea el presente proyecto.

El tratamiento de líquidos es uno de los procesos fundamentales en las industrias de bebidas, o en las empresas de distribución del agua potable para las ciudades; con base en ello, las asignaturas de instrumentación y control impartidas en la carrera de ingeniería electrónica de la Universidad Industrial de Santander, en pro de emular dichos sistemas, desarrolla un sistema de tanques acoplados, en el cual, su objetivo principal es regular el nivel en uno de los tanques, para ello se utiliza un conjunto de sensores, actuadores especiales, además, de un controlador lógico programable (PLC) de altas prestaciones de la empresa Allen-Bradley. El presente proyecto aportará una oportunidad al laboratorio de instrumentación y control de la E3T UIS, para que los estudiantes puedan confrontar la teoría con la práctica, y así hacerse una idea más clara de lo que se pueden encontrar en el campo laboral.

El desarrollo del trabajo se divide en cinco partes: en la primera se presentan los antecedentes y el planteamiento del problema. Para la segunda, se describe la estructura física que conforma al sistema de trabajo, además se incluye el funcionamiento de los instrumentos a utilizar (válvulas, sensores, controlador industrial), junto con los montajes realizados. En la tercera, se identifica y se muestra el cálculo de los parámetros. En la cuarta, se presenta el sistema de control, con la programación del correspondiente PLC. En la quinta se presenta la implementación del controlador en el PLC. En la sexta y séptima se muestran las conclusiones que se obtienen del desarrollo del proyecto de grado, además de incluir algunas recomendaciones.

1. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de grado se desarrolla en el contexto de contribuciones que buscan recuperar la capacidad funcional del laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS, orientándose hacia el caso del control de nivel de líquidos empleando un PLC industrial de altas prestaciones. En particular, como complemento a otros trabajos de grado donde se ha realizado el acondicionamiento de sistemas de laboratorio para ejemplificar procesos a escala, el trabajo propuesto se encargará de configurar la instrumentación necesaria para actuar y monitorear un sistema de tanques rectangulares, complementario al ya existente de tanques cilíndricos. En el proceso de configuración, se deberá resolver el método de monitoreo de nivel y emplear válvulas de tipo proporcional y encendido-apagado para manipular las variables del sistema. También deberá realizarse una exploración del PLC CompactLogix 1769-L32E, de manera que puedan evidenciarse todas sus capacidades potenciales, dejando un sistema didáctico para demostraciones en asignaturas afines al Control y a la Instrumentación Electrónica, en los programas de pregrado de la E3T.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La automatización de procesos industriales representa beneficios no solo a nivel de aumento de productividad y reducción de mano de obra (específicamente intervención humana), sino también de consumo energético y de impacto ambiental, tras incorporar tecnologías que facilitan el registro y manipulación de variables, de modo presumiblemente inviable en el pasado.

Algunos ejemplos de referentes para plantas automatizadas en Colombia, incluyen la embotelladora de Bavaria S.A, en Tocancipá - Cundinamarca (repotenciada en 2012 para aumentar su producción a 10.2 MhL anuales de cervezas y maltas tanto para el consumo local como de exportación) y la estación para el procesamiento de productos lácteos de Alpina S.A. en el municipio de Entreríos - Antioquia (con la capacidad de procesar 330 kL de leche, representados en casi 30.000 toneladas de producto empacado por año, con una línea de producción soportada por tan sólo 211 operarios).

Es precisamente esta ventaja tecnológica la que apalanca la necesidad de formar profesionales competentes en el diseño e implementación de soluciones automatizadas con impacto en el ámbito industrial colombiano. La Universidad Industrial de Santander no es ajena a esta intención, y por ello desarrolla actividades orientadas a la dotación y adecuación de un espacio propicio para formar competencias técnicas experimentales en los estudiantes de los programas académicos de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T). En particular, se dispone de un espacio físico en el aula LAT-209, denominado "Laboratorio de Control e Instrumentación", donde se imparten las asignaturas afines al área de Control e Instrumentación Electrónica. Dentro de los proyectos desarrollados para fortalecer la capacidad del laboratorio se destacan: "Planeación, diseño y realización del laboratorio de Instrumentación Electrónica para la E3T" [1], "Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T" [2] y "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" [3].

De otro lado, en la Universidad Industrial de Santander se han desarrollado varios proyectos de grado relacionados con el control y la automatización de sistemas de nivel de líquido, entre ellos se destacan: [4]-[9]. Particularmente, en [7]-[9] se realizó la configuración de prototipos de laboratorio sobre los cuales se propondrá en el presente proyecto un trabajo complementario que buscará obtener resultados similares para el control de nivel en un sistema de tanques, empleando un PLC de tecnología ALLEN-BRADLEY previamente estudiado en [10].

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

- Instrumentar un sistema de tanques rectangulares para realizar control de nivel empleando el PLC CompactLogix 1769-L32E

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar, a partir de un prototipo existente, la topología para un sistema de control de nivel en un sistema de tanques rectangulares
- Acondicionar la instrumentación necesaria para implementar un sistema de control de nivel empleando el PLC CompactLogix 1769-L32E
- Desarrollar un protocolo de pruebas para verificar el apropiado funcionamiento del sistema

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

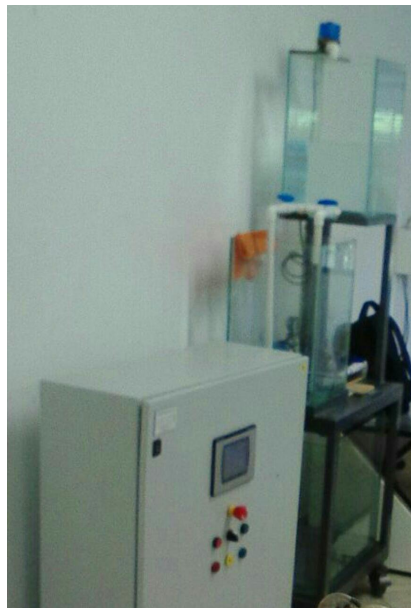
En el presente capítulo se describe el sistema sobre el cual se realizará control de nivel de líquido en el laboratorio de instrumentación y control de la E3T-UIS (LAT-209), así como también una descripción detallada de las características de los sensores, los actuadores y el controlador usados para realizar el control PID.

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema está conformado por un Controlador Lógico Programable (*PLC* por sus siglas en inglés) CompactLogix 1769-L32E montado en un tablero de control como se observa en la figura Figura1a, la planta está compuesta por 3 tanques de dos tamaños diferentes, contruidos en vidrio con base rectangular y dispuestos en una estructura metálica a diferentes alturas tal como se ve en la figura Figura1b.

Figura1: Sistema general

(a) Tablero de control

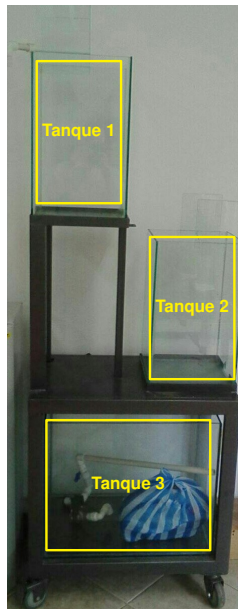


(b) Tanques



2.1.1. Sistema de tanques Está compuesto por tres tanques de base rectangular a diferentes alturas, contruidos en vidrio tal como se muestra en la figura Figura2. Los tanques 1 y 2 tienen base cuadrada de 30x30 [cm²] y altura de 50 cm para una capacidad de 41 L, cada uno cuenta con un orificio en la parte baja de un lateral para usarse como salida. El tanque 3 tiene base rectangular de 60x40 [cm²] y altura de 50 cm para una capacidad de 113 L.

Figura2: Sistema de tanques

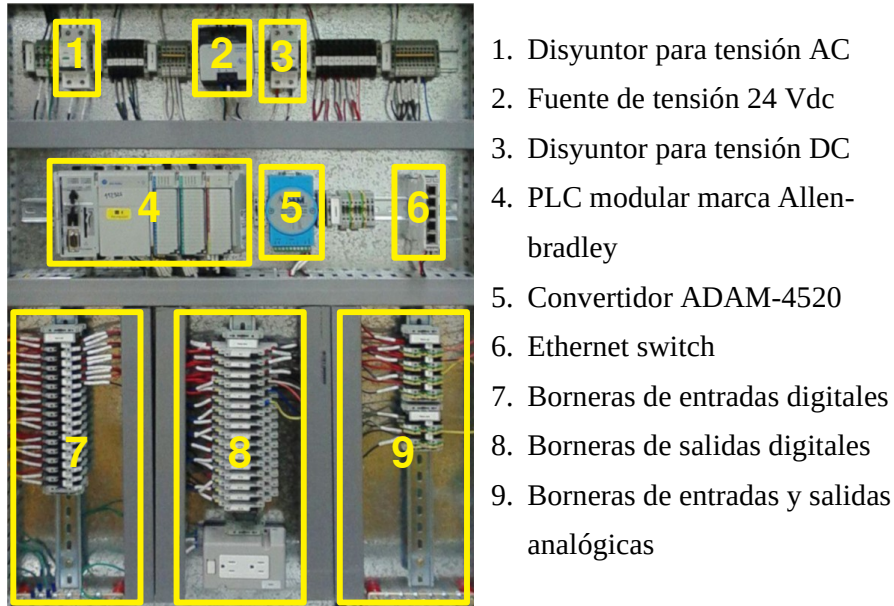


2.1.2. Tablero de control Tal como lo describen Suárez Hernández y Fernández Duarte

«El sistema cuenta con un tablero de control, diseñado acorde a normas y requerimientos, para uso interior o exterior con las condiciones típicas de una estación petrolera en zona tropical, ambiente industrial con agentes corrosivos, radiación solar intensa y ambiente húmedo. El principal componente de este tablero es el PLC CompactLogix 1769-L32E, que en conjunto con elementos periféricos permiten la realización de control proporcionando seguridad de conexión y comunicación».[10]

En la figura Figura3 se puede apreciar los elementos que se encuentran dentro del tablero de control que reciben las señales provenientes de campo, de una forma ordenada y aprovechando el mínimo espacio.

Figura3: Tablero de control



2.1.2.1. Controlador Lógico Programable (PLC) El elemento central para el control del proceso está constituido por un PLC modular marca Allen-Bradley, considerado como de gama media-alta. El dispositivo se compone por: Controlador CompactLogix 1769-L32E, Fuente 1769-PA2, Módulo de entradas digitales 1769-IQ16, Módulo de salidas digitales 1769-OB16, Modulo combinado de Entradas/Salidas analógicas 1769-IF4XOF2, tal como se muestra en la figura Figura4. La programación del dispositivo se realiza a través del paquete de herramientas RSLogix 5000, exclusivo del fabricante Allen-Bradley.

Figura4: PLC Allen-Bradley



2.1.3. Válvula ON/OFF Se dispone de varias válvulas de solenoide serie UW-25 como se ve en la figura Figura5.

Figura5: Válvula on/off



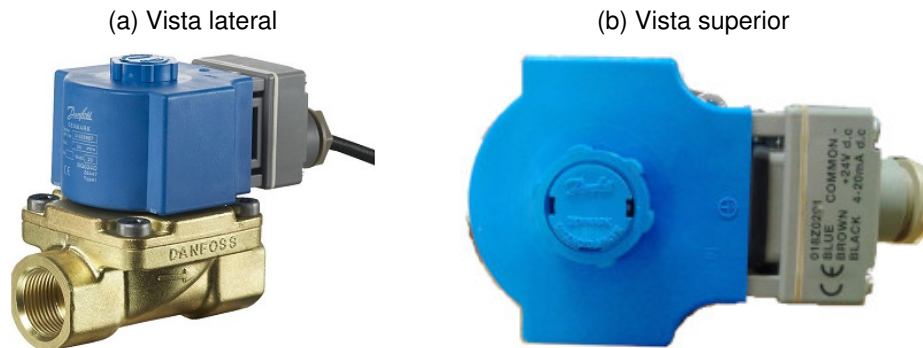
Esta válvula es de dos vías tipo on/off (todo o nada), sus características se detallan en la tabla Tabla 1

Tabla 1: Características válvula on/off

| Característica | Valor |
|---|-------------------|
| Tensión de operación | 110/220 Vac |
| Frecuencia | 50/60 Hz |
| Tamaño Conexión | 1" |
| Temperatura Fluido | - 5°C ~ 80°C |
| Presión de operación kg/cm ² | 0 - 5 (para Agua) |
| Peso kg | 1.8 |

2.1.4. Válvula Proporcional La válvula tipo proporcional disponible es una Danfoss EV260B como la mostrada en la figura Figura6

Figura6: Electroválvula proporcional



Este tipo de válvula permite variar su apertura linealmente con una señal de control de 4 a 20 mA (a mayor corriente mayor apertura), algunas características se muestran en la tabla Tabla 2

Tabla 2: Características válvula proporcional

| Característica | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tensión de operación | 24 Vdc |
| Señal de control | 4 – 20 mA |
| Potencia de la bobina | 20 W (máximo) |
| Aislamiento del bobinado | 250 Ω |
| Rango de caudal completo | 0,5 – 12,7 m ³ /h |
| Presión diferencial | 0,5 – 10 bar |
| Conexiones roscadas | G 1/4 – G 3/4 |
| Temperatura de operación | -25 °C a 50 °C |

Fuente: www.danfoss.com

2.1.5. Bomba sumergible Se cuenta con una bomba de agua tipo sumergible marca Evans, modelo AQUA30W como se muestra en la figura Figura7

Figura7: Bomba de agua sumergible



Fuente: www.evans.com

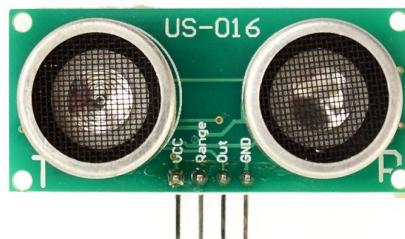
Algunas características de la bomba sumergible se describen en la tabla Tabla 3

Tabla 3: Características bomba de agua sumergible

| Característica | Valor |
|----------------------|------------|
| Tensión de operación | 127 Vac |
| Potencia | 30 W |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Flujo máximo | 19.2 L/min |
| Altura máxima | 2.3 m |

2.1.6. Sensor de nivel Para monitorear el nivel de fluido se eligió usar el sensor *US-16* como el mostrado en la figura Figura8. Este es un sensor de proximidad de bajo costo que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 2 a 300 cm. Su salida es una tensión analógica proporcional a la distancia medida. El sensor está integrado por dos transductores: un emisor y un receptor piezoeléctricos, además de la electrónica necesaria para su operación.

Figura8: Sensor de proximidad



El funcionamiento del sensor es el siguiente: el emisor piezoeléctrico emite 8 pulsos de ultrasonido (40kHz) luego de recibir la orden en el pin TRIG, las ondas de sonido viajan en el aire y rebotan al encontrar un objeto, el sonido de rebote es detectado por el receptor piezoeléctrico, luego el pin ECHO cambia a Alto (5V) por un tiempo igual al que demoró la onda desde que fue emitida hasta que fue detectada.

Algunas características del sensor de proximidad se muestran en la tabla Tabla 4

Tabla 4: Especificaciones técnicas del sensor de proximidad

| Característica | Valor |
|---------------------------|-----------------------|
| Tensión de operación | 5 Vdc |
| Salida analógica | 0 - 5 Vdc |
| Corriente de trabajo | 3.8 mA |
| Distancia de medición | 2 - 300 cm |
| Precisión | 0.3 cm + 1 % |
| Frecuencia de ultrasonido | 40 kHz |
| Ángulo de apertura | 15° |
| Temperatura de operación | 0 - 70 °C |
| Dimensiones | 45 mm x 20 mm x 15 mm |

Los pines de conexión del sensor de proximidad se muestran en la tabla Tabla 5

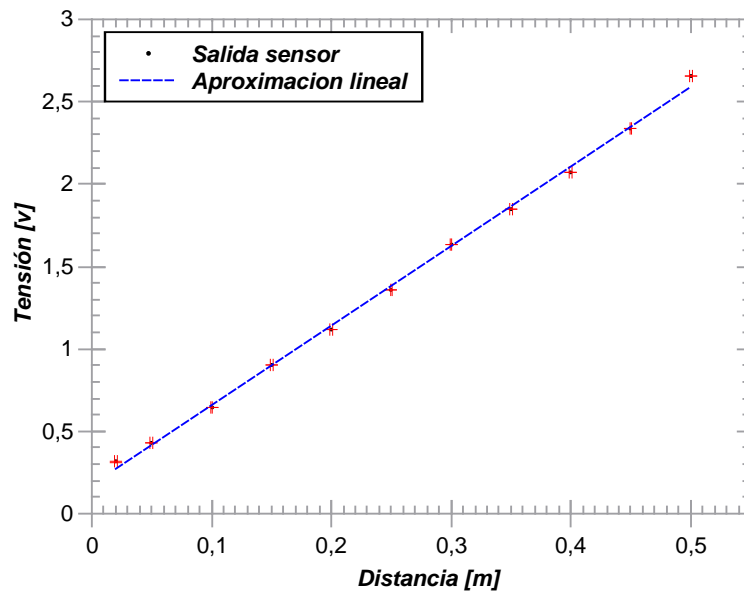
Tabla 5: Pines del sensor de proximidad

| Pines de conexión | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Vcc | 5 Vdc |
| Range | Flotante o Vcc para 3m, GND para 1 m |
| Out | Salida analógica |
| GND | Tierra - 0 V |

Caracterización del sensor de nivel Para caracterizar y verificar la salida del sensor de proximidad, se ajustó un obstáculo frente al sensor en 11 magnitudes diferentes, para cada una se tomaron 10 valores de tensión de salida del sensor ¹. Posteriormente estos valores se promediaron, de esta manera se obtiene una relación lineal entre el valor promedio de tensión respecto a la distancia medida como se muestra en la figura Figura9

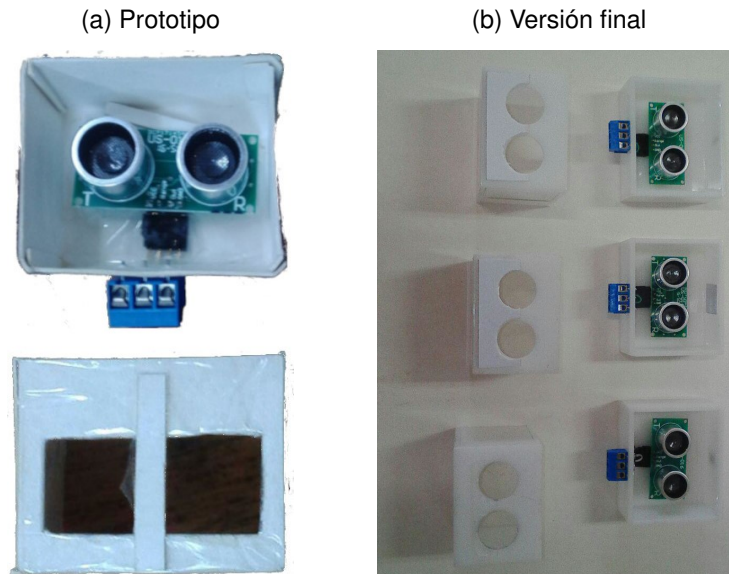
¹Para la medición de la distancia se usó un flexómetro estándar con resolución de 1 mm y para la medición de la tensión se utilizó un multímetro marca Fluke modelo 117 con resolución de 1 mV (este último disponible en el Laboratorio)

Figura9: Salida sensor de proximidad



Para ubicar los sensores de nivel en los tanques se diseñó una caja rectangular adecuada a la forma y tamaño del sensor. El modelo de las cajas fue diseñado para evitar posibles interferencias y permitir un fácil acceso al sensor. Para verificar lo anterior se realizó un prototipo en cartón y luego se fabricó la versión final en acrílico (figura Figura10)

Figura10: Caja para el sensor de nivel



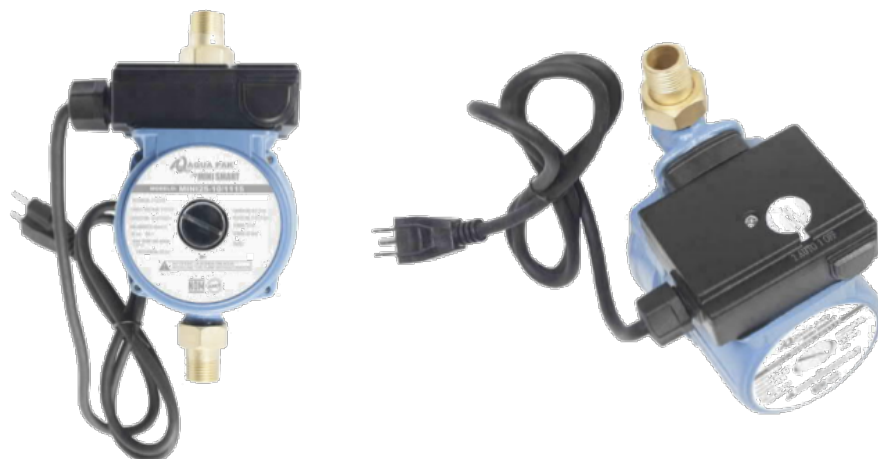
La caja para el sensor de nivel se fija en la parte superior al interior de cada uno de los tanques.

2.1.7. Bomba de agua MINI SMART AQUA PAK El laboratorio también cuenta con otra bomba de agua, esta presenta mejores características técnicas que la bomba sumergible, ya que gracias al diseño y tecnología de esta, la presión de salida es superior.

La bomba posee un sensor especial, que hace que se active únicamente cuando se asegura que en su interior circula agua.

«La MINI SMART de la marca AQUA PAK es un equipo automático y sencillo de presurización. Ideal para instalaciones en donde la presión del agua requiera ser mayor a la disponible, tanto por confort en la casa como para la operación de equipos especiales como los calentadores de paso, lavavajillas, etc.» [11]

Figura11: Bomba de agua MINI SMART



Fuente: SOLAIRE. Manual del Usuario, Bomba presurizadora automática serie mini smart mini25-10/1115 - 110v. solaire

Algunas características de la bomba se detallan en la tabla Tabla 6

Tabla 6: Características bomba Mini Smart

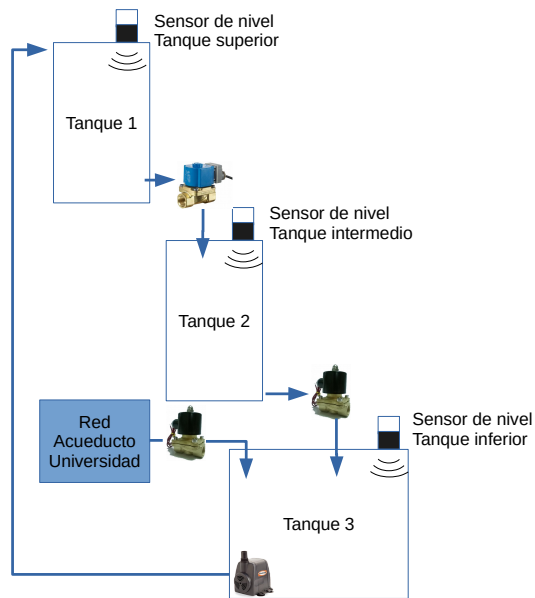
| Característica | Valor |
|----------------------|----------|
| Tensión de operación | 115 Vac |
| Potencia | 120 W |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Aislamiento | Clase H |
| Protección | IP44 |
| Flujo máximo | 25 L/min |
| Altura máxima | 10 m |

Fuente: SOLAIRE. Manual del Usuario, Bomba presurizadora automática serie mini smart mini25-10/1115 - 110v. solaire

2.2. DISEÑO INICIAL

Se plantea el primer diseño del sistema teniendo en cuenta conocimientos muy básicos del funcionamiento de cada uno de los elementos disponibles. Se propone entonces una topología adecuada para el control de nivel tal como se muestra en la figura Figura12.

Figura12: Topología planteada



La dinámica del sistema es tomar agua de la red de acueducto de la universidad (en el laboratorio existe un punto de acceso a la misma) para llenar el Tanque 3 y usarlo como tanque de almacenamiento. Desde el Tanque 3 llevar el agua al Tanque 1 a la salida del Tanque 1, ubicar la válvula proporcional para comunicar con el Tanque 2, a la salida del Tanque 2 se ubica una válvula on/off y de esta se comunica al Tanque 3, de esta forma se tiene recirculación del fluido en los tres tanques.

2.3. MONTAJE

El montaje se realizó en paralelo entre la planta (tanques, bomba de agua, válvulas, accesorios y tuberías de PVC) y el controlador (PLC y su respectivo cableado), a continuación se describen las dos partes.

2.3.1. Montaje planta Para realizar el montaje de la topología planteada (figura Figura12) se verifica que los tanques no presenten fugas, se elige tubería y accesorios de PVC de media pulgada para interconectar los tanques con los respectivos elementos como se describe a continuación:

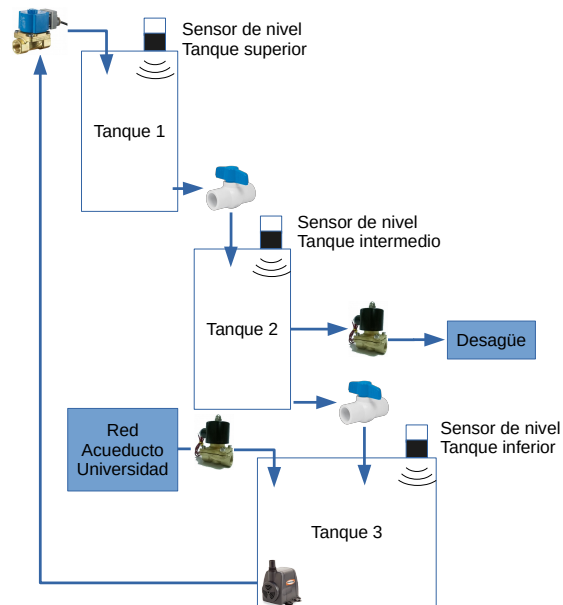
- En la salida del Tanque 1 se instala la válvula proporcional y paralela a esta una válvula manual para usarse como perturbación.
- En la salida del Tanque 2 se instala una válvula on/off.
- En el Tanque 3 se instala la bomba sumergible.

Para realizar el montaje de la topología planteada (figura Figura12) se eligió como sensor de nivel el descrito en la sección 2.1.6.

2.4. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL 1

Durante el proceso de montaje de la planta se observó que la válvula proporcional debe ubicarse justo después de la bomba de agua (Entrada Tanque 1), ya que donde se plantea inicialmente (salida del Tanque 1) no hay suficiente presión para que haya un cambio en el caudal a partir de una apertura aproximada del 20% en la válvula proporcional, también se ubica una válvula on/off a la salida del Tanque 2 para ir a desagüe y paralelo una válvula manual para que continúe la circulación hacia el Tanque 3, tal como se muestra en la figura Figura13

Figura13: Topología modificada

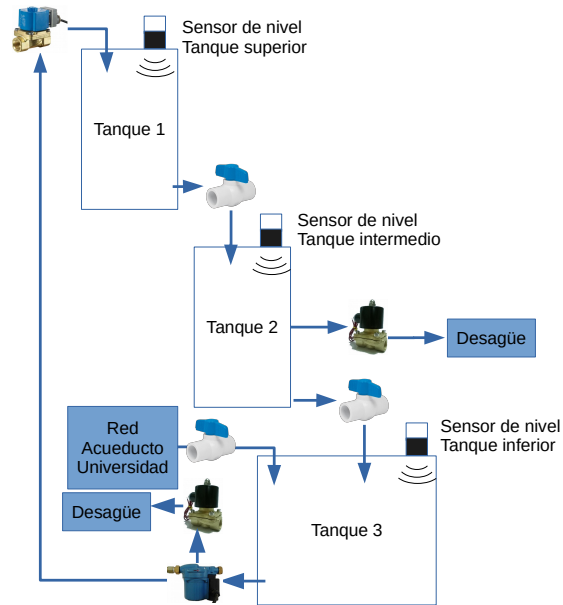


2.5. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL 2

Al realizar el montaje anterior, la altura a la que la bomba de agua sumergible debe llevar el agua (desde el fondo del Tanque 3 hasta la parte superior del Tanque 1) es de 1.7 m. La bomba sumergible no provee suficiente caudal (aproximadamente 14 L/min), por tal motivo se decide cambiar la bomba de agua sumergible descrita en la sección 2.1.5, por la bomba de agua Mini Smart descrita en la sección 2.1.7.

Para instalar esta bomba de agua, es necesario hacer una perforación en el lateral del Tanque 3. la bomba de agua requiere un flujo mínimo para operar, por lo cual es necesario instalar una válvula on/off entre esta y el desagüe. La topología se modifica nuevamente (figura Figura14)

Figura14: Topología final



2.6. MONTAJE PLC

Como se aprecia en la figura Figura1a el tablero de control se encontraba en el piso del laboratorio, haciendo complicada la apertura de este y un riesgo para las personas que transitan en el laboratorio, es por ello que este se fija a la pared usando unos soportes metálicos (figura Figura15). Además, esto facilita y hace mas estético realizar las conexiones de los diferentes cables que entran a él con la caja de distribución donde se conectan los demás elementos.

Figura15: Tablero de control fijo en la pared



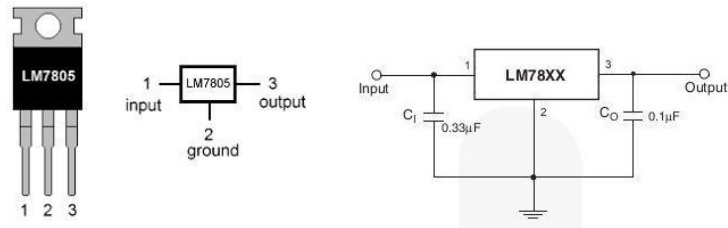
2.7. CABLEADO DE ALIMENTACIÓN

El cableado se realizó y organizó de la siguiente manera:

Para la alimentación se llevan cables de 120 Vac (fase, neutro y tierra) para energizar la bomba de agua y las dos válvulas on/off y cables de 24 Vdc para energizar la válvula proporcional y los sensores. Estos últimos requieren un circuito adicional para reducir la tensión de 24 Vdc a 5 Vdc, para ello se emplea un Regulador de tensión LM7508.

Regulador 7508 Es un dispositivo electrónico que tiene la capacidad de regular la tensión a 5 Vdc y hasta 1 A de corriente, La tensión de entrada puede ser de hasta 35 Vdc y la tensión de salida es regulada a 5 Vdc. Su conexión se muestra en la figura Figura16

Figura16: Regulador de tensión LM7508

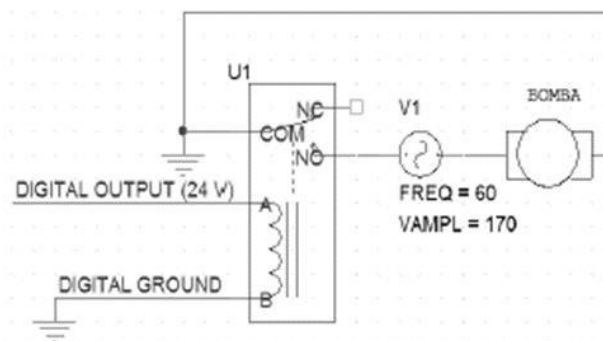


2.7.1. Cableado de Entradas y Salidas También se realiza el cableado para las señales de entradas y la señal de salida.

Tipo Analógico Las señales de tipo analógico son 4, tres entradas de tensión correspondientes a los tres sensores de nivel y una salida de corriente correspondiente a la válvula proporcional.

Tipo Digital La señales de tipo digital son las correspondientes a la activación de la bomba de agua y a las válvulas on/off. Para activar estos elementos que funcionan a 120 Vac usando una señal digital de 24 Vdc es necesario un circuito adicional (figura Figura17).

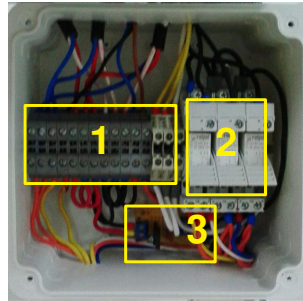
Figura17: Circuito de activación de elementos Vac



Los circuitos de: regulación de tensión y activación de elementos Vac, junto con borneras de conexión se hallan dentro de una caja de distribución ubicada en la planta. En

estas borneras se conectan las señales de alimentación y de activación provenientes del Tablero de control y las señales provenientes de los sensores (figura Figura18).

Figura18: Caja de distribución



1. Borneras de conexión
2. Circuito activación elementos Vac
3. Circuito regulador de tensión (24 Vdc a 5 Vdc)

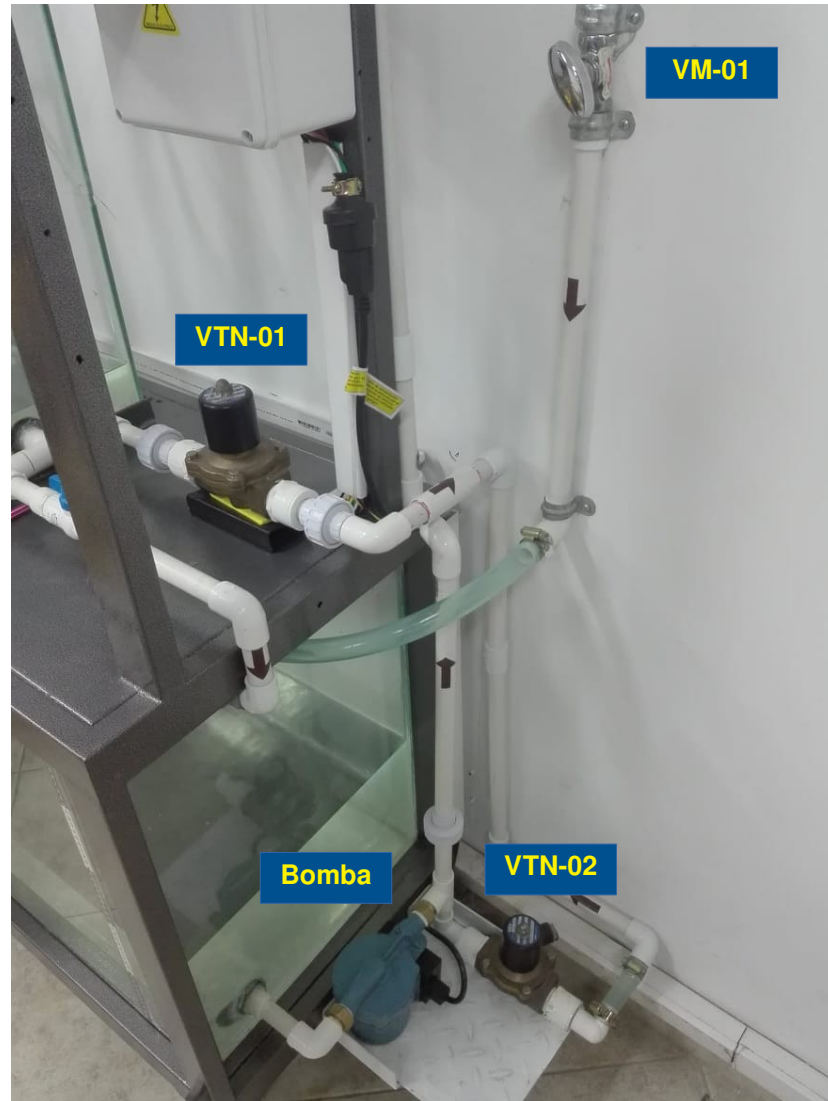
Al finalizar el montaje de todo el sistema, Planta más controlador quedó como se observa en la figura Figura19.

Figura19: Montaje final del sistema



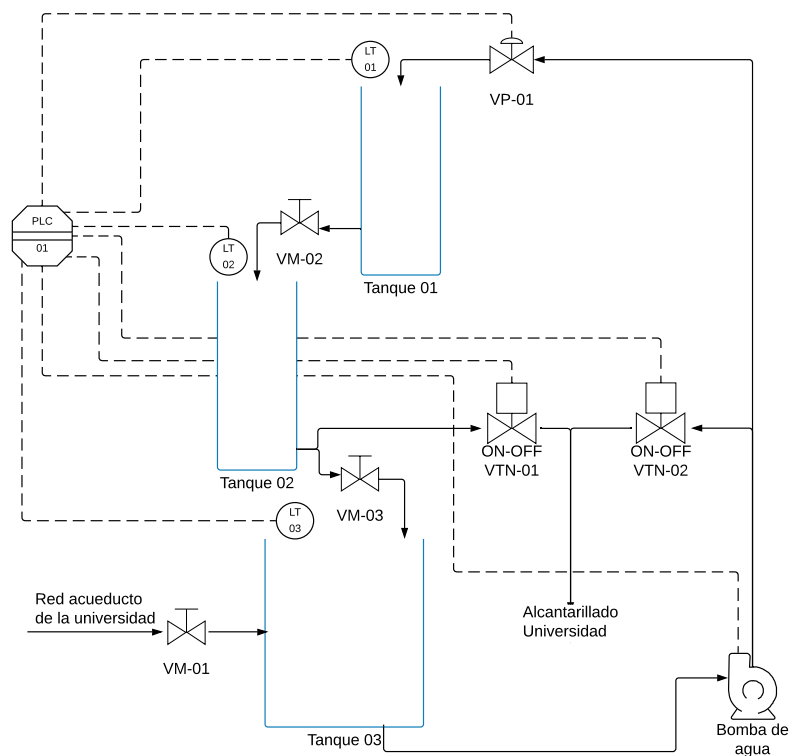
En la figura Figura20 se aprecia el arreglo de las tuberías, junto con la bomba y las válvulas.

Figura20: Arreglo de tuberías



Un diagrama P&ID de la planta se muestra en la figura Figura21

Figura21: Diagrama P&ID de la planta



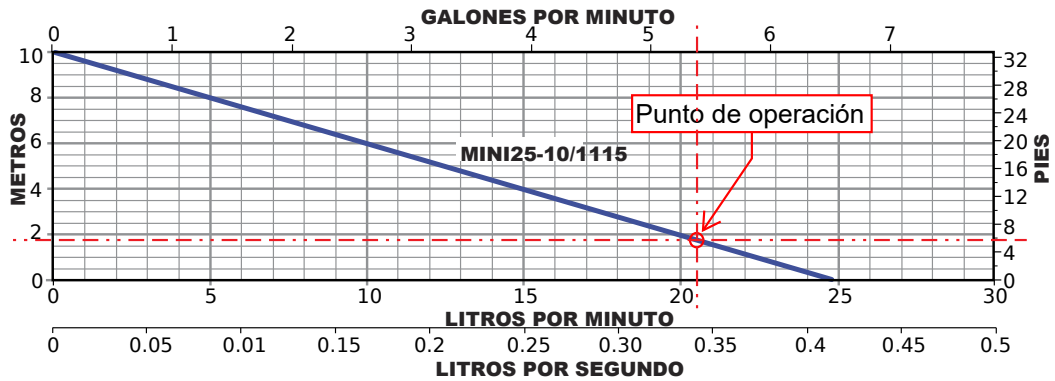
2.8. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Finalizado el montaje del sistema, se realizaron pruebas con el fin de definir las condiciones de operación de la bomba de agua (sección 2.1.7) y la válvula proporcional (sección 2.1.4).

2.8.1. Condiciones para la bomba de agua La bomba de agua incorpora un sensor de flujo. Si no se detecta un flujo mínimo la bomba no se activa. Por ello, fue necesario después de la bomba ubicar una válvula on/off hacia el desagüe. De modo que para activar la bomba de agua se debe activar la válvula por un instante de tiempo con el fin que haya un flujo mínimo y la bomba se active. Después de que se activa la bomba, se cierra la válvula on/off y el agua fluye hacia la válvula proporcional y finalmente al Tanque 1.

La curva de rendimiento de la bomba se observa en la figura Figura22

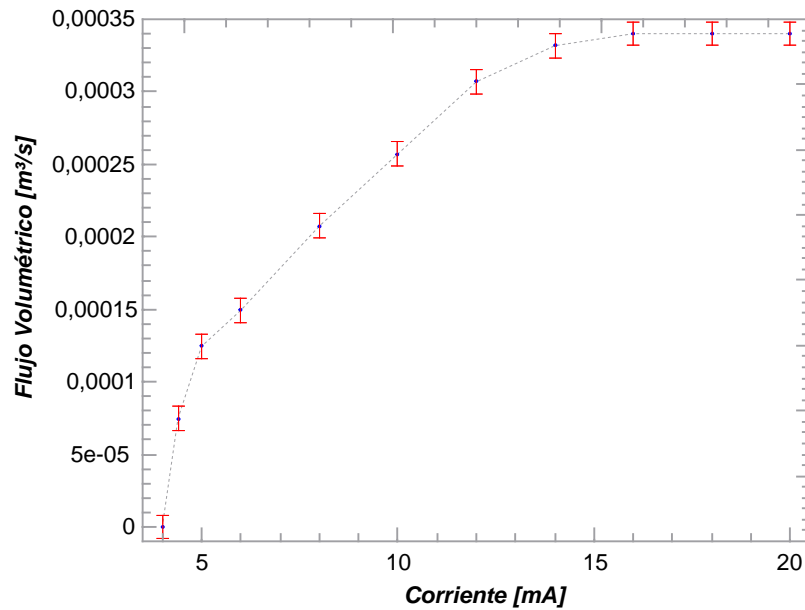
Figura22: Curva de rendimiento de la bomba



FUENTE: www.solaire.com

2.8.2. Condiciones para la válvula proporcional Para definir las condiciones en la válvula proporcional, se realizó la siguiente prueba. Con el Tanque 1 vacío. Se mantuvo cerrada la válvula de salida y se usaron diferentes aperturas en la válvula proporcional (corriente entre 4 y 20 mA), mientras se activó la bomba de agua durante 10 segundos. Se midió el volumen de agua (en Litros) contenido en el Tanque 1 en cada ocasión y se dividió en 10 [s] para calcular el caudal o flujo volumétrico [L/s]. Posteriormente convirtió a [m^3/s] y se realizó la gráfica de caudal contra corriente (figura Figura23).

Figura23: Flujo volumétrico



Se puede observar que a partir de una apertura en la válvula de 16 [mA], el caudal se mantiene constante. El caudal máximo es de 0,0003400704 [m³/s] el equivalente a 20,4 [L/min]. Esto es debido a que la distancia desde el fondo del Tanque 3 hasta la parte superior del Tanque 1 es de 1,7 [m]. Como se observa en la curva de rendimiento de la bomba (figura Figura22). A una altura de 2 [m] se tiene un caudal de 20 [L/min].

Se observa que hay una zona lineal (4,4 - 12 [mA]).

3. IDENTIFICACIÓN DE MODELO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS

En este capítulo se define la función de transferencia que representa el comportamiento del sistema. También se define el valor de los parámetros de dicho modelo matemático mediante pruebas experimentales.

3.1. SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO

Cuando se analizan sistemas de flujo de líquidos, es necesario clasificar el tipo de flujo, pudiendo ser laminar o turbulento de acuerdo a la magnitud del número de Reynolds[12]. Los sistemas que presentan flujo laminar se pueden representar con ecuaciones diferenciales lineales. Frecuentemente en los sistemas industriales donde hay flujo de fluidos a través de tubos y tanques presentan flujo turbulento. Estos flujos se representan mediante ecuaciones diferenciales no lineales. Si la región de operación está acotada estas ecuaciones se pueden linealizar.

3.1.1. Resistencia hidráulica «La resistencia R para el flujo de líquido en tal tubo se define como el cambio en la diferencia de nivel necesaria para producir un cambio de una unidad en el caudal»[12]

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de nivel } [m]}{\text{Cambio en la velocidad del flujo } [m^3/s]}$$

Si el flujo es laminar, la relación entre el caudal en estado estable y la altura en estado estable se tiene por:

$$Q = KH$$

Dónde, Q = Caudal del líquido en estado estable $[m^3/s]$

K = coeficiente $[m^{2,5}/s]$

H = Altura en estado estable $[m]$

La Resistencia para el flujo laminar R_l se da por:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q}$$

Si el flujo es turbulento la relación entre el caudal en estado estable y la altura en estado estable se tiene por:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (3.1)$$

La Resistencia para el flujo turbulento R_t se da por:

$$R_t = \frac{dH}{dQ}$$

Derivando la ecuación 3.1 se tiene

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}}dH$$

Reemplazando y despejando,

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q}$$

Por tanto,

$$R = \frac{2H}{Q}$$

3.1.2. Capacitancia hidráulica «La capacitancia C de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en el potencial (altura)». [12]

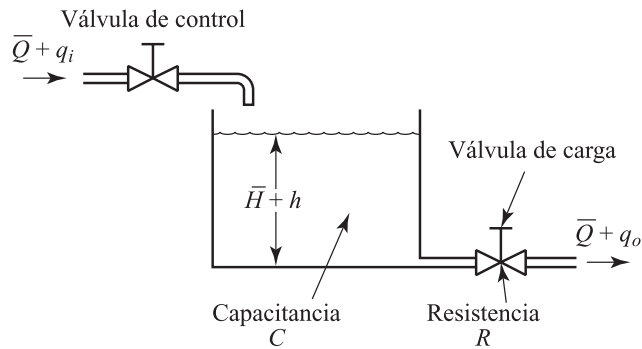
$$C = \frac{\text{Cambio en el liquido almacenado } [m^3]}{\text{Cambio en la altura } [m]}$$

Se puede observar que la Capacitancia corresponde al área de sección transversal. En este caso es constante.

3.2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Considérese el sistema mostrado en la figura Figura24.

Figura24: Sistema de nivel de líquidos



FUENTE: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.aed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN 978-84-8322-660-5

Para realizar el modelo matemático del sistema se parte del principio de conservación de masa, que aplicado a la dinámica de un tanque, se lleva a términos de volúmenes.

$$V_{almacenado} = V_{entra} - V_{sale} \quad (3.2)$$

El volumen del tanque se expresa cómo:

$$V = Ah$$

Dónde, A = Área de sección transversal [m^2]

h = Altura [m]

El área del tanque es constante, además corresponde con la capacitancia hidráulica, por tanto:

$$\frac{dV}{dt} = C \frac{dh}{dt}$$

«A partir de la suposición de que el sistema es lineal o linealizado, la ecuación diferencial de este sistema se obtiene del modo siguiente. Como el cau-

dal de entrada menos el caudal de salida durante el pequeño intervalo de tiempo dt es igual a la cantidad adicional almacenada en el tanque»[12]

$$C \frac{dh}{dt} = (q_i - q_o) dt$$

Partiendo de la definición de resistencia hidráulica (3.1.1) se tiene la relación entre q_o y h mediante:

$$q_o = \frac{h}{R}$$

De este modo la ecuación diferencial para el sistema, con un valor constante de R , se convierte en:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (3.3)$$

Obsérvese que RC es la constante de tiempo del sistema. Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (3.3), con condiciones iniciales iguales a cero, se tiene:

$$RCsH(s) + H(s) = RQ_i(s) \quad \text{dónde} \quad H(s) = \mathcal{L}\{h\} \quad \text{y} \quad Q_i(s) = \mathcal{L}\{q_i\}$$

Si q_i es la entrada y h la salida, la función de transferencia resulta:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3.4)$$

La entrada al sistema es un caudal. La variable manipulada por el sistema de control es una corriente. La expresión que relaciona el caudal de entrada con la corriente es

$$Q_i(s) = K_v \cdot I(s) \quad (3.5)$$

Reemplazando en (3.4) se llega a la expresión que relaciona la altura del tanque en función de la corriente entregada a la válvula proporcional

$$\frac{H(s)}{I_i(s)} = \frac{R \cdot K_v}{RCs + 1} \quad (3.6)$$

3.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS

3.3.1. Capacitancia La capacitancia, como ya se mencionó, corresponde al área de sección transversal del tanque. Los tanques tienen base rectangular, por tanto su capacitancia se define por:

$$C = l \cdot l \quad [m^2]$$

La capacitancia para cada uno de los tanques se muestra en la tabla Tabla 7

Tabla 7: Capacitancia de los tanques

| Tanque | Ancho [m] | Profundo [m] | Capacitancia [m^2] |
|----------|-----------|--------------|------------------------|
| Tanque 1 | 0,288 | 0,288 | 0,082944 |
| Tanque 2 | 0,288 | 0,288 | 0,082944 |
| Tanque 3 | 0,588 | 0,388 | 0,228144 |

3.3.2. Resistencia hidráulica La Resistencia hidráulica, se determinó en forma experimental.

El experimento consistió en mantener una apertura aproximada del 50 % en la válvula de salida del Tanque 1 (VM-2), tal como se ve en la figura Figura25. Mantener una señal de control de 4,5 [mA] en la válvula proporcional (VP-1). Se esperó hasta que el sistema se estabilizó en un nivel (se estabilizó en 5 [cm]). Una vez estabilizado se aplicó una entrada tipo escalón al sistema. Esto es aumentar súbitamente la señal de control pasando de 4,5 [mA] a 4,72 [mA] y nuevamente se esperó hasta que el sistema se estabilizó en nivel superior (se estabilizó en 10,8 [cm]). La respuesta al escalón de la entrada se muestra en la figura Figura26.

Figura25: Apertura de la válvula manual

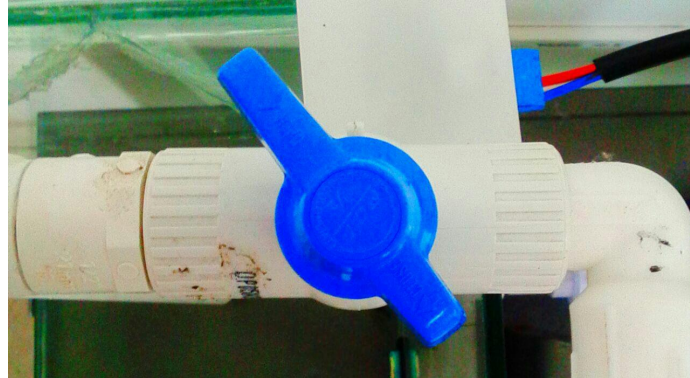
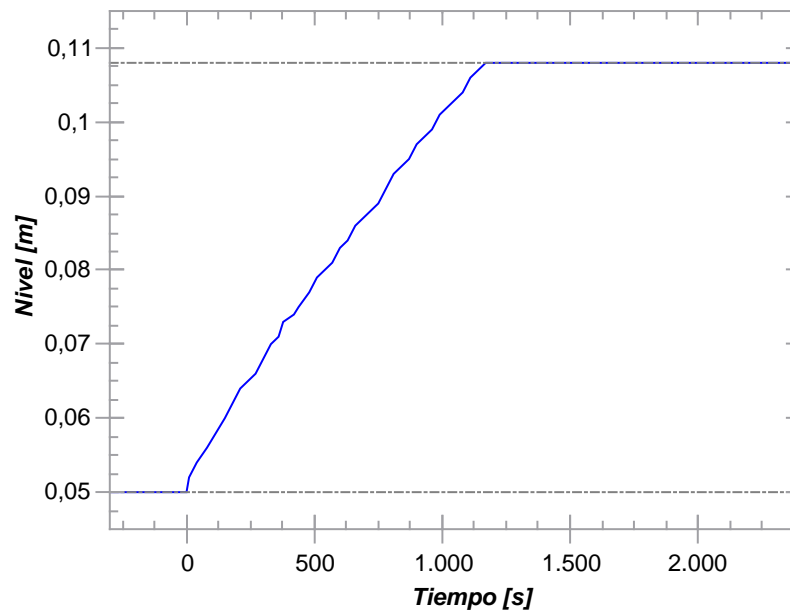


Figura26: Respuesta al escalón del sistema



Con los datos de la respuesta al escalón del sistema se calculó el valor de la constante de tiempo del sistema τ . La constante de tiempo τ , es el tiempo al cual la señal alcanza el 63 % del valor final. Para esto se desarrollo un script en Matlab®¹ para interpolar por tres métodos diferentes (Interpolación lineal, cúbica y tira cúbica) el valor de τ . Los diferentes valores hallados se detallan en la tabla Tabla 8

¹Software de MathWorks ®

Tabla 8: Valores de τ

| Método | Valor de τ |
|---------------------------|-----------------|
| Interpolación lineal | 676,2 [s] |
| Interpolación cúbica | 675,1453 [s] |
| Interpolación tira cúbica | 675,1508 [s] |
| Valor promedio | 675,4987 [s] |

Los tres valores de τ hallados se promediaron para tomar el valor promedio como el valor de la constante de tiempo del sistema. Al tener el valor de la constante de tiempo y el de la capacitancia, se calcula el valor de la resistencia, a partir de:

$$\begin{aligned}\tau &= RC \\ R &= \frac{\tau}{C}\end{aligned}\tag{3.7}$$

Al reemplazar los valores de τ y C en la ecuación (3.7) se tiene:

$$R = \frac{675,4987}{0,082944} = 8144,0332 \left[\frac{s}{m^2} \right]$$

Así, reemplazando en la ecuación de función de transferencia (3.6):

$$\frac{H(s)}{I(s)} = \frac{8144,0332}{675,4987s + 1} \cdot K_v$$

Partiendo de la figura Figura23 se determina un valor para K_v dando:

$$K_v = 0,00002624874 \left[\frac{m^3}{mA \cdot s} \right]$$

por tanto la función de transferencia de la planta resulta:

$$\frac{H(s)}{I(s)} = \frac{0,2138}{675,4987 \cdot s + 1}\tag{3.8}$$

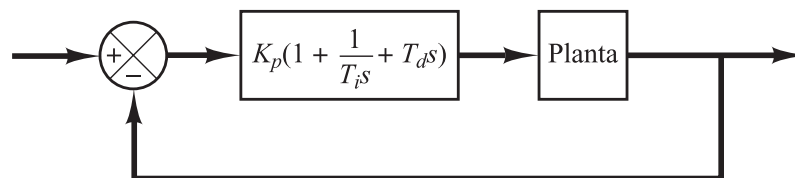
4. SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se presenta el proceso de desarrollo del control de nivel. El cálculo de los parámetros del controlador PID usando el modelo obtenido en el capítulo 3. Para el diseño se emplean estrategias de control clásico y su comportamiento se observa con ayuda de Matlab®¹.

4.1. CONTROL DE NIVEL EN EL TANQUE 1

Para el control de nivel en el tanque 1 se diseñó un controlador PID. La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En el campo de los sistemas para control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio.[12]

Figura27: Control PID en una planta



FUENTE: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.aed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN 978-84-8322-660-5

Otra forma de representar la ecuación del controlador es por medio de ganancias:

$$PID = kp + \frac{ki}{s} + kd \cdot s$$

$$kp = K_p, \quad ki = \frac{K_p}{T_i}, \quad kd = K_p \cdot T_d$$

¹Software de MathWorks ®

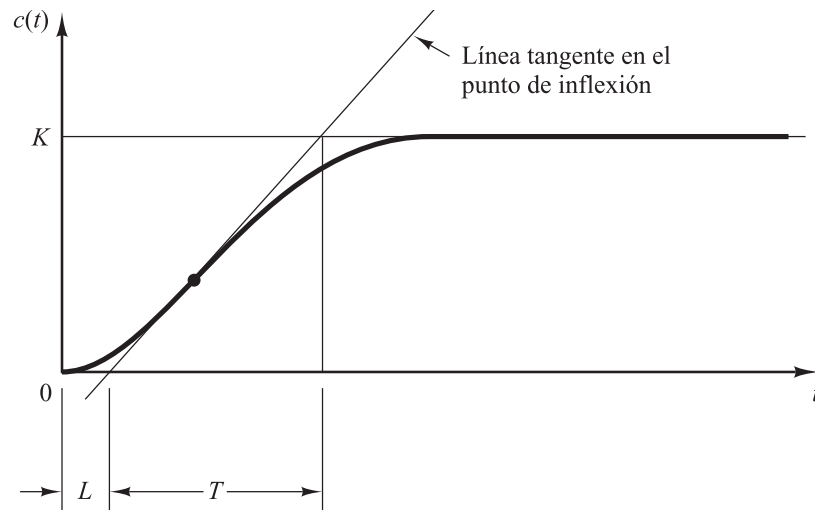
A continuación se presenta el diseño de un controlador PID utilizando las reglas de diseño de Ziegler y Nichols.

4.1.1. Reglas de Ziegler-Nichols

«El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. A partir del método de Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales» [12]

El método de Ziegler-Nichols usado consiste en aplicar una entrada tipo escalón a la planta y ver su respuesta. La respuesta tiene forma de S. Dicha respuesta se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Se determinan trazando una recta tangente al punto de inflexión de la curva y midiendo las intersecciones con el eje tiempo y con la línea $c(t)$ (figura Figura28).

Figura28: Respuesta al escalón en forma de S



FUENTE: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.aed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN 978-84-8322-660-5

Con los valores de T y L se calculan los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo a la tabla Tabla 9

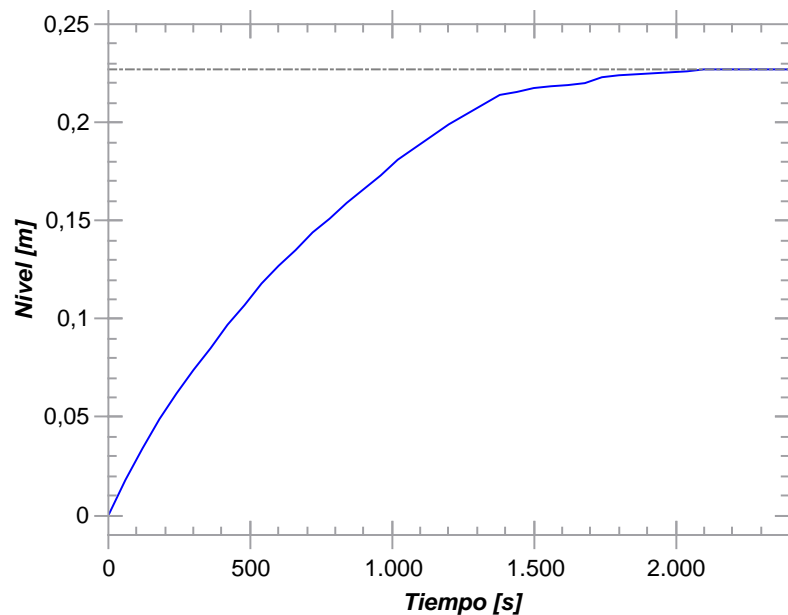
Tabla 9: Regla de Ziegler-Nichols basado en la respuesta al escalón

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|------------------|-------------|---------------|
| P | T/L | ∞ | 0 |
| PI | $0,99 \cdot T/L$ | $L/0,3$ | 0 |
| PID | $1,2 \cdot T/L$ | $2 \cdot L$ | $0,5 \cdot L$ |

FUENTE: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.aed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN 978-84-8322-660-5

El experimento realizado para aplicar el método de Ziegler-Nichols consistió en: con el Tanque 1 vacío y la válvula de salida abierta. Se activó la bomba de agua y se abrió la válvula proporcional con una corriente de 7 [mA] (simulando el escalón) hasta que el nivel del tanque se estabilizó (figura Figura29).

Figura29: Respuesta al escalón en el Tanque 1



Para poder determinar los valores de L y T, en forma analítica se sigue un proceso similar

al hallado en [8]. Se reescribe la ecuación (3.4) en la forma:

$$H(s) = \frac{R}{RCs + 1} \cdot Q_i(s) \quad (4.1)$$

Donde $Q_i(s)$ corresponde a una entrada tipo escalón de amplitud U .

$$Q_i(t) = U \cdot u(t) \implies Q_i(s) = \frac{U}{s}$$

Para simplificar cálculos, de la definición de la Resistencia se reescribe como:

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{dh}{U}$$

Reemplazando en (4.1) se obtiene:

$$H(s) = \frac{dh}{RCs + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

Expandiendo en fracciones parciales:

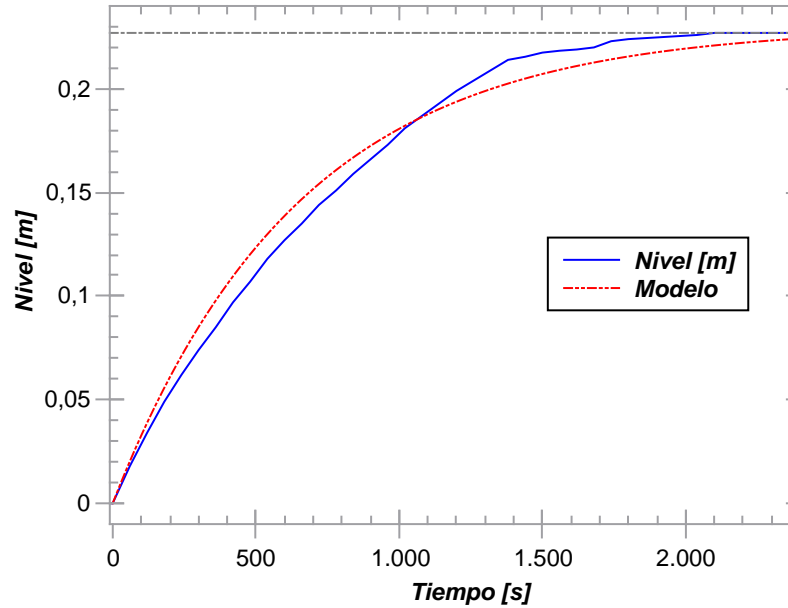
$$H(s) = \frac{dh}{s} - \frac{dh}{s + 1/\tau}$$

Para hallar la función $h(t)$, se aplica la transformada inversa de Laplace a $H(s)$ es decir, $h(t) = \mathcal{L}^{-}\{H(s)\}$, quedando:

$$h(t) = dh - dh \cdot e^{-\frac{1}{\tau} \cdot t} \quad (4.2)$$

En la figura Figura30 se comparan los datos experimentales con el modelo propuesto en (4.2), demostrando que el modelo es válido.

Figura30: Validación del modelo propuesto



En los datos experimentales se observa que el punto de inflexión está cerca a 120 [s] ($t_i = 120$ [s]). Se conoce la constante de tiempo del sistema $\tau = 675,4987$ [s]. Se conoce el cambio de altura $dh = 0,227$ [m]. Para hallar la recta tangente al punto de inflexión. Se define:

$$m = h'(t)|_{t=t_i} = 0,000281352 \quad b = h(t)|_{t=t_i} = 0,036946904289890$$

La recta tangente para el punto de inflexión se define como [8]:

$$\begin{aligned} l(t) &= b + (t - t_i) \cdot m \\ &= m \cdot t + (b - t_i \cdot m) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$l(t) = 0,000281352 \cdot t - 0,003184630702749$$

Para hallar el valor de tiempo en el cual se cruza por cero t_0 se iguala la ecuación (4.3) a 0 y para hallar el tiempo al cual alcanza el estado estacionario t_f se iguala a dh . Finalmente $L = t_0$ y $T = t_f - t_0$. Resultando, $L = 0,086195$ y $T = 795,4125$. Los valores de los parámetros se detallan en la tabla Tabla 10

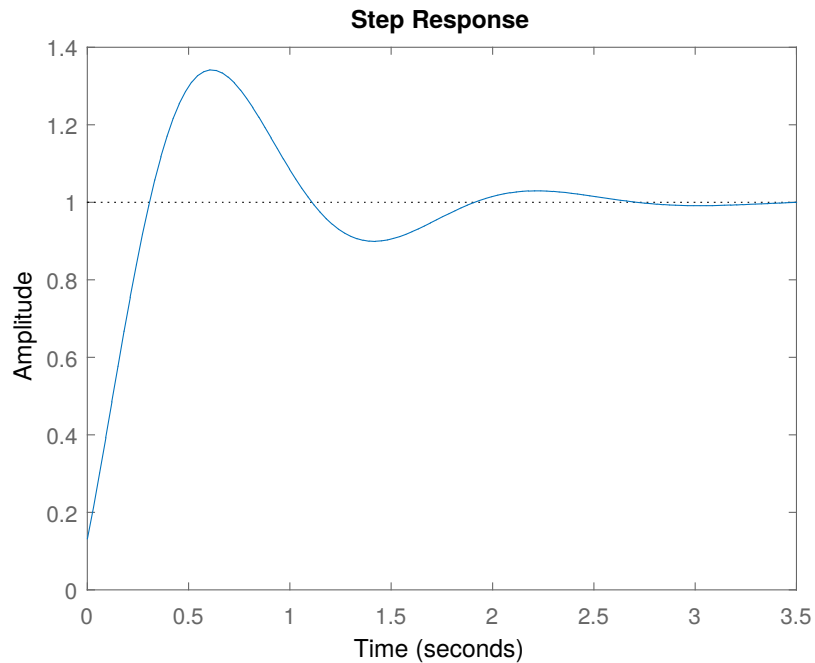
Tabla 10: Parámetros del controlador

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------------------|
| K_p | 11073,69687902987 |
| T_i | 0,172389582507997 |
| T_d | 0,043097395626999 |

De los valores mostrados se observa que el proceso es mayormente proporcional.

Conociendo la función de transferencia de la planta (Ecuación 3.8). Se realiza la respuesta al escalón del sistema con el controlador. (figura Figura31)

Figura31: Respuesta de la planta con controlador



Con la aproximación de valores K_p , T_i y T_d hallados por el método de Ziegler-Nichols al realizar la simulación en Matlab se observa que es necesario hacer sintonización.

La repuesta al controlador sintonizado se observa en la figura Figura32

Figura32: Respuesta de la planta con controlador sintonizado

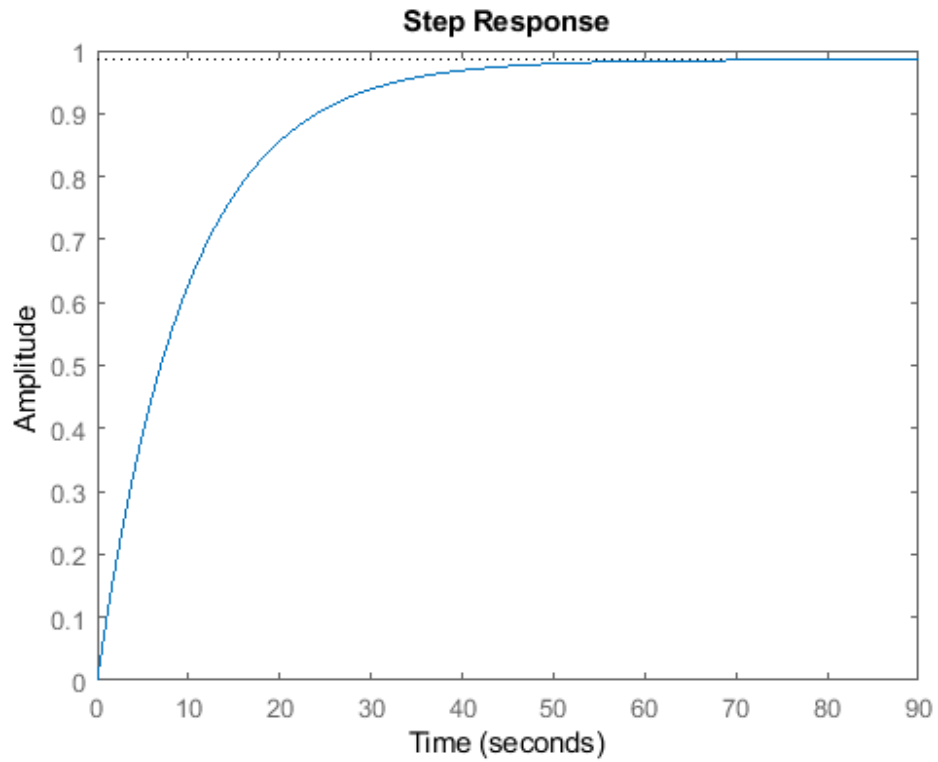


Tabla 11: Parámetros del controlador sintonizado

| Parámetro | Valor |
|-----------|--------|
| K_p | 316,31 |
| K_i | 0,0131 |

Se procede a implementar el controlador PID en el PLC. Para ello se emplea el software RSLogix 5000.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR EN PLC

En este capítulo se describe la implementación del controlador en el PLC. La adquisición de las señales y las diferentes rutinas implementadas.

5.1. CONSIDERACIONES

Para la lectura de las señales de los sensores se cuenta con el módulo analógico combinado de entradas y salidas de la marca Allen-Bradley Número de catálogo 1769-IF4XOF2.

Este módulo está compuesto por 4 entradas y 2 salidas. Las entradas y salidas pueden ser de corriente (4- 20 [mA]) o de tensión (0 - 10 [v]). Cuenta con una bornera para cada tipo.

Una descripción más detallada de este módulo se puede encontrar en [10].

5.1.1. Error de cuantización El módulo destina una palabra para cada canal de entrada o salida. Los bits en la palabra se distribuyen como se muestra en la tabla Tabla 12.

Tabla 12: Palabra de entrada módulo analógico

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|
| Bit | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Valor | SGN | A7 | A6 | A5 | A4 | A3 | A2 | A1 | A0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: [13]

Como se observa cada entrada tiene 8 bits de resolución (bits 7 a 14). Por tanto el número de niveles L para cuantizar la señal analógica de entrada es $L = 2^8 = 256$. Con un valor máximo de la señal de entrada de 10,5 [v]. Se tiene una resolución Δ :

$$\Delta = \frac{10,5 [v]}{L} = 0,04101562 [v]$$

El error de cuantización se define como

$$\frac{\Delta}{2} = 0,02050781 [v]$$

5.1.2. Conversión de la señal de entrada Para la conversión de la señal de entrada se usan los datos de la tabla Tabla 13 y la ecuación (5.1).

Tabla 13: Datos de entrada módulo analógico

| FullInputRange | Significant Bits | Resolution per LSB | RawInput (dec) | CountValue |
|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------|
| 0 V to 10.5 V | Sign + 8 bits | 41.18 mV | 0 to 32640 | 128 (LSB) |
| 0 mA to 21 mA | Sign + 8 bits | 82.35 mA | 0 to 32640 | 128 (LSB) |

Fuente: [13]

$$\text{Volts} = \frac{\text{Input data value} \cdot \text{Resolution per LSB}}{\text{Count Value}} \quad (5.1)$$

Por ejemplo, si el dato de entrada es 32640 equivale a:

$$\begin{aligned} \text{Volts} &= \frac{32640 \cdot 0,04118}{128} \\ &= 10,50 [v] \end{aligned}$$

5.1.3. Variables Para realizar la programación del PLC se definen las variables de entrada (Tabla Tabla 14) y las variables de salida (Tabla Tabla 15) como variables globales.

Tabla 14: Variables de entrada

| Nombre | Dirección | Descripción |
|-----------|-------------------|--|
| EMERGENCY | Local:1:I.Data.0 | Parado de emergencia, N.C. |
| SW_R | Local:1:I.Data.1 | Switch a la derecha |
| SW_L | Local:1:I.Data.2 | Switch a la izquierda |
| PSH_GREEN | Local:1:I.Data.3 | Pulsado verde, N.O. |
| PSH_RED | Local:1:I.Data.4 | Pulsador Rojo, N.C. |
| Ain0 | Local:3:I.Ch0Data | Tensión analógica, proviene del Sensor 1 |
| Ain1 | Local:3:I.Ch1Data | Tensión analógica, proviene del Sensor 2 |
| Ain2 | Local:3:I.Ch2Data | Tensión analógica, proviene del Sensor 3 |

Tabla 15: Variables de salida

| Nombre | Dirección | Descripción |
|------------|-------------------|-------------------------------------|
| PLT_GREEN | Local:2:O.Data.0 | Piloto Verde |
| PLT_RED | Local:2:O.Data.1 | Piloto Rojo |
| PLT_YELLOW | Local:2:O.Data.2 | Piloto Amarillo |
| VTN_02 | Local:2:O.Data.3 | salida para activar válvula VTN-02 |
| bomba | Local:2:O.Data.4 | salida para la activar la bomba |
| VTN_01 | Local:2:O.Data.5 | salida para activar válvula VTN-01 |
| I_out | Local:3:O.Ch1Data | Salida corriente para apertura VP-1 |

También se definen algunas variables locales para el escalamiento de las señales de entrada y su conversión a distancia en centímetros. De las variables locales destacan:

Tabla 16: Variables locales destacadas

| Nombre | Descripción |
|--------|----------------------------------|
| Nivel1 | Nivel medido en el Tanque 1 [cm] |
| Nivel2 | Nivel medido en el Tanque 2 [cm] |
| Nivel3 | Nivel medido en el Tanque 3 [cm] |
| Toff1 | Temporizador para activar VT_02 |

5.1.4. Bloque escalamiento En el software RSLogix. El bloque escalamiento se encuentra disponible en programación de bloques y texto estructurado [14]. Como parámetros importantes tiene: *In*, *InRawMin*, *InEUMax*, *InEUMin*, *InRawMax*, *Out*.

InRawMin e *InRawMax*, corresponden a la lectura *RawInput (dec)* según la tabla Tabla 13.

InEUMin e *InEUMax*, corresponden al Recorrido de la variable leída (0 - 10 [V]), (4-20 [mA]). La salida es definida por la ecuación:

$$\text{Out} = (\text{In} - \text{InRawMin}) \cdot \left(\frac{\text{InEUMax} - \text{InEUMin}}{\text{InRawMax} - \text{InRawMin}} \right) + \text{InEUMin} \quad (5.2)$$

5.1.5. Bloque PID En el software RSLogix. El bloque PID se encuentra disponible en el diagrama tipo escalera. Como parámetros importantes tiene: *Process Variable*, *Control Variable*, *SetPoint*, *Ganancia proporcional K_p* , *Ganancia integral K_i* , *Ganancia derivativa K_d* .

- *Process Variable* es la variable controlada, en este caso el *Nivel1*.
- *Control Variable*, es la variable manipulada, en este caso *I_out*.
- Para los valores de K_p , K_i , K_d se ingresan los valores hallados en la tabla Tabla 11.
- Para el *SetPoint* se debe ingresar un valor en centímetros. El valor predeterminado es de 20 [cm].

5.2. PROTOCOLO DE OPERACIÓN

Para llevar a cabo el proceso de control de nivel en forma adecuada, es necesario verificar que se cumplan las siguientes condiciones de operación.

- Mantener el área de trabajo despejada.

- Abrir la válvula manual 1 (VM-1) y llenar el Tanque 3 hasta una altura de 40 [cm]
- Encender el sistema. Para esto se conecta el tablero de control a la tensión AC, se activan los disyuntores de tensión AC y DC
- Crear una rutina para activar la bomba de agua y verificar la correcta recirculación en el sistema
- Crear una rutina de control de nivel
- Seleccionar un SetPoint y verificar el control de nivel
- Apagar el sistema. Para esto se desactivan los disyuntores de tensión DC y AC, se desconecta el tablero de control de la tensión AC
- Una vez se apaga el sistema el agua se almacena en el Tanque 3 por gravedad.

Si se requiere cambiar el agua del sistema se debe crear una rutina para activar las válvula on/off 1 y 2 (VTN-1, VTN-2) hasta que el agua en el Tanque 3 llegue a una altura de 10 [cm]

5.3. RUTINAS

Se realizaron diferentes rutinas para implementar el controlador. Las rutinas se describen por medio de diagramas de flujo.

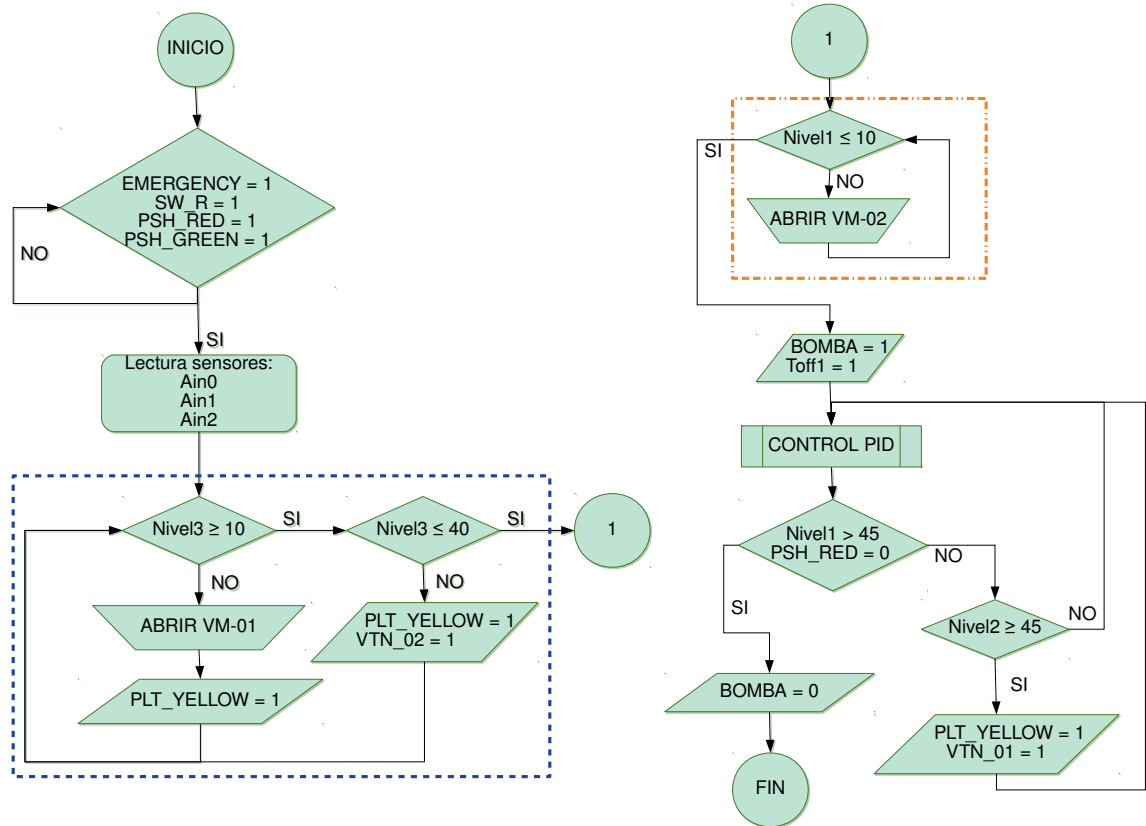
En la rutina principal. Después de realizada la lectura de los sensores, se verifica que el Tanque 3 tenga suficiente agua. Se verifica que el Tanque 1 tenga poco nivel de agua o esté vacío.

Durante el proceso de control de nivel se monitorea el nivel en el Tanque 2. Si este se llena se activa la válvula VTN-01 para que se desocupe y se activa el piloto amarillo para informar que algo sucede. Sin embargo esto no afecta el proceso de control de nivel en el Tanque 1.

Si el nivel en el Tanque 1 supera los 45 [cm]. Se apaga la bomba de agua y se finaliza el proceso de control de nivel.

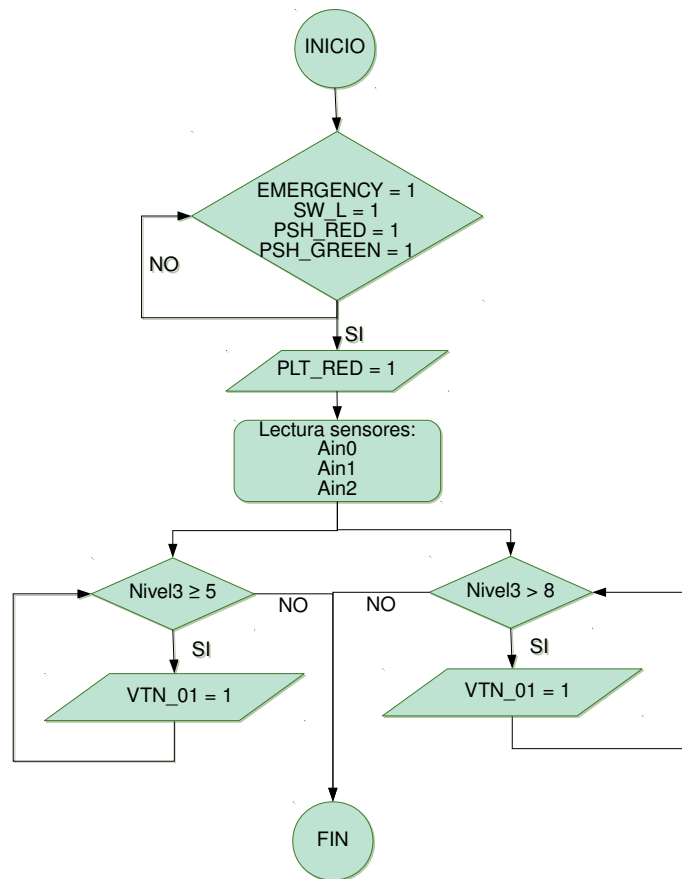
La rutina principal se muestra en la figura Figura33.

Figura33: Descripción de la rutina principal



Se implementó una rutina para desagüe. Para cuando se requiera cambiar el agua. Esta rutina verifica si los Tanques 2 y 3 tienen más de un nivel determinado de agua y de ser así abren las válvulas on/off respectivas para desaguar (figura Figura34)

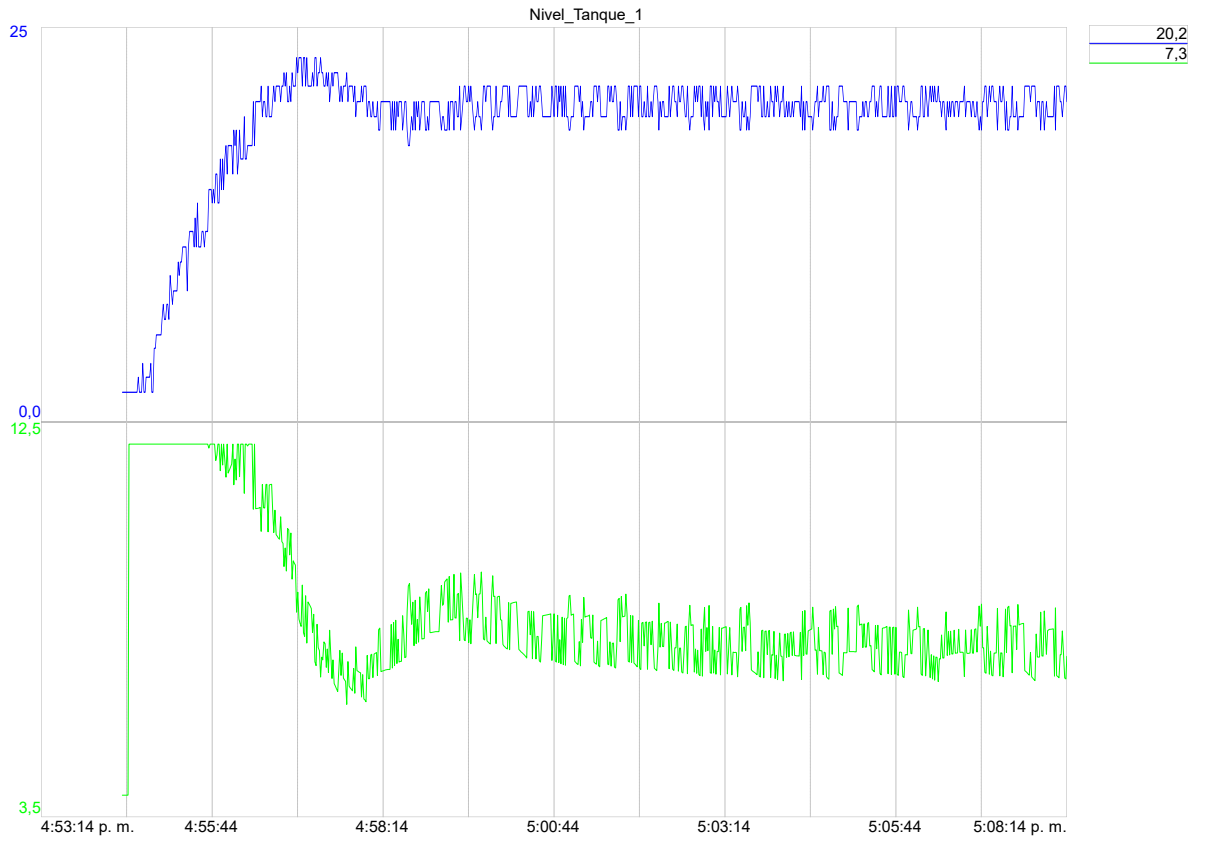
Figura34: Rutina de desagüe



5.4. VERIFICACIÓN DEL CONTROLADOR

Al implementar las rutinas en el PLC, se ajustó el SetPoint en 20 cm y se tomaron datos para verificar su funcionamiento. (figura Figura35)

Figura35: Controlador implementado en PLC



La gráfica azul corresponde al nivel medido en el Tanque 1 y la gráfica verde corresponde a la corriente en la válvula proporcional.

6. CONCLUSIONES

Con base en los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos en el presente proyecto de grado, se puede concluir que, fue posible construir un prototipo de laboratorio para regular el nivel de líquidos en un sistema de tanques rectangulares, empleando equipos de instrumentación industrial, que permitieron realizar una acción de control con una estrategia PID. En particular:

- Se construyó a partir de elementos disponibles, un sistema de recirculación de agua como modelo a escala a de un proceso industrial en el Laboratorio de Alta Tensión (LAT-209). En la sección 2.8 (figura Figura19), se ilustra la configuración de un sistema constituido por: una bomba de agua, 3 electroválvulas (dos de topología ON/OFF y una de tipo proporcional), 3 sensores de proximidad ultrasónico analógico y un tablero de control en el cual se encuentran: un PLC Allen-Bradley de la serie ControlLogix 1769, una fuente de tensión de 24 Vdc entre otros elementos (sección 2.1.2).
- Se configuraron e instrumentaron los elementos requeridos para la instalación y puesta en marcha de un lazo de control de nivel basado en un PLC ALLEN-BRADLEY. En la sección 2.8.2 se explica la adecuación de las señales de entrada y salida del PLC (sensores y actuadores). En la sección 3.2 se analiza el modelo matemático que mejor describe el sistema. En la sección 4.1 se especifica el método de sintonización de control para obtener los parámetros, y se explica la forma en que se compara los datos obtenidos con los valores teóricos y los que se obtienen con el control en el sistema implementado. Por último, en la sección 5.2 se expone las rutinas que se utilizan para poder iniciar la acción de control en el sistema de recirculación.

7. RECOMENDACIONES

- En la sección 5.3 se crea una rutina principal donde hay de parada de emergencia, esto debido a que los 3 tanques no son simétricos (ver sección 2.1.1), los tanques 1 y 2 almacenan el mismo volumen aproximadamente 41 litros, pero el tanque 3 es de mayor capacidad, aproximadamente 113 litros, se diseño especialmente para almacenar el mismo volumen de los dos tanques, sin embargo, este es capaz de almacenar un tanto más de lo que se requería, por ello a modo de observación y recomendación, y tal como se detalla en la sección 5.3 el tanque 3 debe llenarse a una altura que no sea superior a los 40 [cm], volumen que a nuestra consideración, es suficiente para que el sistema funcione en perfectas condiciones.
- Para evitar daños en alguno de los elementos eléctricos, y en especial de la bomba, recomendamos cambiar el agua cada cierto tiempo, ya que el sistema esta expuesto a impurezas del ambiente (polvo, pequeños insectos, etc.). Para ello se crea la *Rutina de desagüe* (figura Figura34)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. F. NOVOA DIAZ, J. A. PRADA MEJIA y S. M. SAYAGO PEÑALOZA, *Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2001.
- [2] E. E. TORRES SANCHES y D. H. RAMIREZ VEGA, *Sistema de gestión para un prototipo de sistema scada en el laboratorio de instrumentación de la E3T*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [3] L. Y. NEIRA DUARTE y R. I. PRADA MEDINA, *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*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [4] L. C. MANTILLA ESPINOSA y J. A. AMAYA PALACIO, *Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y evaluación de estrategias*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [5] C. I. SUÁREZ MORENO y C. A. RODRÍGUEZ PÉREZ, *Diseño de un sistema de control automático de nivel del condensador de la unidad uno en la central termoeléctrica de paipa*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003.
- [6] M. ACOSTA GALVIS y L. A. GÓMEZ MALAGON, *Control del nivel de la caldera piro-tubular del laboratorio de plantas térmicas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [7] A. J. ATUESTA ROBLEDO y J. A. VELANDIA SUAREZ, *Instrumentación y puesta en marcha de un control de nivel de líquidos empleando un PLC ALLEN-BRADLEY*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [8] S. J. ACELAS SUÁREZ y A. M. MENDOZA DÍAZ, *Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un plc siemens S7-1200*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [9] C. Y. PEÑARANDA, W. R. SILVA y E. GÓMEZ ARIAS, *Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014.

- [10] J. A. SUÁREZ HERNÁNDEZ y W. A. FERNÁNDEZ DUARTE, *Automatización de procesos. Desarrollo de material didáctico basado en el PLC Compactlogix 1769-I32E*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [11] Solaire, *Manual del Usuario, Bomba presurizadora automática serie mini smart mini25-10/1115 - 110v*. dirección: www.solaire.com.co.
- [12] O. KATSUHIKO, *Ingeniería de Control Moderna*, 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010, pág. 904, ISBN: 978-84-8322-660-5.
- [13] Rockwell Automation Technologies, *Compact™ 8-Bit Low Resolution Analog I/O Combination Module - User Manual*, 2001.
- [14] —, *LOGIX 5000 Controllers Advanced Process Control and Drives and Equipment Phase and Sequence Instructions*, 2018.

BIBLIOGRAFÍA

ACELAS SUÁREZ, Silvia Johanna y MENDOZA DÍAZ, Ana Milena. *Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un plc siemens S7-1200*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

ACOSTA GALVIS, Mauricio y GÓMEZ MALAGON, Luis Arturo. *Control del nivel de la caldera piro-tubular del laboratorio de plantas térmicas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.

ATUESTA ROBLEDO, Anderson Julián y VELANDIA SUAREZ, Julián Alexander. *Instrumentación y puesta en marcha de un control de nivel de líquidos empleando un PLC ALLEN-BRADLEY*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

KATSUHIKO, Ogata. *Dinámica de sistemas*. 1.^a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1987. ISBN 9789688800744.

KATSUHIKO, Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN 978-84-8322-660-5.

MANTILLA ESPINOSA, Luis Carlos y AMAYA PALACIO, Jose Alejandro. *Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y evaluación de estrategias*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005.

NEIRA DUARTE, Lidia Yaneth y PRADA MEDINA, Ricardo Iván. *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*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.

NOVOA DIAZ, Daniel Fernando; PRADA MEJIA, Jorge Andres y SAYAGO PEÑALOZA, Sandra Milena. *Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2001.

PEÑARANDA, Claudia Yaneth; SILVA, Wilson Reinaldo y GÓMEZ ARIAS, Eulices. *Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014.

ROCKWELL AUTOMATION TECHNOLOGIES. *1768 CompactLogix Controllers - User Manual*. Rockwell Automation Publication, 2013.

ROCKWELL AUTOMATION TECHNOLOGIES. *Compact™ 8-Bit Low Resolution Analog I/O Combination Module - User Manual*. Rockwell Automation Publication, 2001.

ROCKWELL AUTOMATION TECHNOLOGIES. *LOGIX 5000 Controllers Advanced Process Control and Drives and Equipment Phase and Sequence Instructions*. Rockwell Automation Publication, 2018.

SOLAIRE. *Manual del Usuario, Bomba presurizadora automática serie mini smart mini25-10/1115 - 110v*. solaire. **disponible en:** www.solaire.com.co.

SUÁREZ HERNÁNDEZ, José Antonio y FERNÁNDEZ DUARTE, Wyllinton Armando. *Automatización de procesos. Desarrollo de material didáctico basado en el PLC Compactlogix 1769-I32E*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

SUÁREZ MORENO, Consuelo Inés y RODRÍGUEZ PÉREZ, Carlos Arturo. *Diseño de un sistema de control automático de nivel del condensador de la unidad uno en la central termoeléctrica de paipa*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003.

TORRES SANCHES, Edgar Ernesto y RAMIREZ VEGA, Diego Hernan. *Sistema de gestión para un prototipo de sistema scada en el laboratorio de instrumentación de la E3T*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2007.