



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**ANÁLISIS DEL CONTROL PID DE UN SISTEMA DIDÁCTICO DE
TANQUES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Dilo Joshua Guilcamaigua González
Meybi Melania Villacis Ortiz
TUTOR: David Humberto Cárdenas Villacrés

Guayaquil-Ecuador

2022

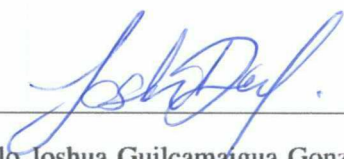
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Dilo Joshua Guilcamaigua González** con documento de identificación N° **1719095836** y **Meybi Melania Villacis Ortiz** con documento de identificación N° **0940815681**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 03 de marzo del año 2022

Atentamente,



Dilo Joshua Guilcamaigua González
1719095836



Meybi Melania Villacis Ortiz
0940815681


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Dilo Joshua Guilcamagua González** con documento de identificación N° **1719095836** y **Meybi Melania Villacis Ortiz** con documento de identificación N° **0940815681**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: ANÁLISIS DEL CONTROL PID DE UN SISTEMA DIDÁCTICO DE TANQUES**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.


En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Guayaquil, 03 de marzo del año 2022

Atentamente,



Dilo Joshua Guilcamagua González
1719095836



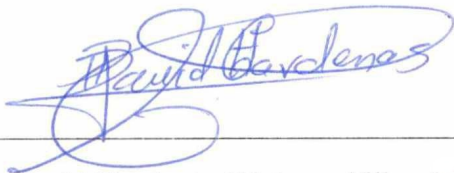
Meybi Melania Villacis Ortiz
0940815681

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **David Humberto Cárdenas Villacrés**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana , declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ANÁLISIS DEL CONTROL PID DE UN SISTEMA DIDÁCTICO DE TANQUES**, realizado por **Dilo Joshua Guilcamaigua González** con documento de identificación N° **1719095836** y por **Meybi Melania Villacis Ortiz** con documento de identificación N° **0940815681**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 03 de marzo del año 2022

Atentamente,



Ing. David Humberto Cárdenas Villacrés, Msc
1716494107

I. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme concluir con éxito mi carrera, a mis padres por toda la ayuda brindada para poder lograr mi título. Agradezco enormemente a mi abuelita, que, aunque no se encuentre presente hoy conmigo, se que desde donde está, me apoya en cada paso que doy.

Así mismo mi eterno agradecimiento a mi tutor Ing David Cárdenas por sus cátedras y su apoyo tanto educativo, como anímico, para lograr concluir mi trabajo de titulación. A todos los miembros del Departamento DTAI, por estar cada día ahí presente apoyándome y colaborando con todo lo que estaba en sus manos. A mi compañero de tesis, ya que sin el todo hubiese sido mas difícil, agradezco a todas y cada una de las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo de este proyecto.

Mi agradecimiento especial a esa persona que ha sido mi apoyo incondicional y me ha ayudado a seguir adelante a pesar de las dificultades.

Meybi Melania Villacis Ortiz

Agradezco a Dios por brindarme la paz mental necesaria para culminar con éxito este proyecto, a mis padres por la enseñanza y valores que sembraron en mí, y a mis abuelitos por cuidarme y protegerme cuando era un niño. También agradezco a mis compañeros académicos por su ayuda prestada, y al departamento DTAI por el amable personal que lo conforman, y como no a mi compañera de tesis que con ella compartimos criterios, pensamientos y consejos para la culminación de este trabajo.

Agradezco a mi tutor el Ing. David Cárdenas, quien me aconsejo desde el inicio del proyecto, y mantuvo en mí el ímpetu para el desarrollo de esta tesis.

Dilo Joshua Guilcamaigua González

II. RESUMEN

En este trabajo se implementa una planta didáctica de tanques, en la cual se puede modificar los parámetros PID mediante un HMI KTP600, y observar los cambios que pueda tener en base a un análisis previo. La experimentación forma parte del proceso metodológico, enfocado a una población de industria, con sistemas de control de nivel por PID, y temperatura ON/OFF. Los resultados del análisis de modificación de parámetros PID dan paso a la deducción de valores ideales para cierta dinámica. El análisis realizado en este trabajo, en base a la experimentación descrita, nos ha permitido concluir que de los parámetros PID, el tiempo derivativo afecta directamente a la estabilización, y se debe dar un valor nulo, de esa manera la estabilización es ideal.

Palabras claves: SetPoint (SP), Variable de Proceso (PV), Variable Controlada (CV).

III. ABSTRACT

In this work, a didactic tank plant is implemented, in which the PID parameters can be modified by means of an HMI KTP600, and the changes they may have based on a previous analysis can be observed. The experimentation is part of the methodological process, focused on an industrial population, with PID level control systems and ON/OFF temperature. The results of the PID parameter modification analysis lead to the deduction of ideal values for certain dynamics. The analysis carried out in this work, based on the experimentation described, has allowed us to conclude that of the PID parameters, the derived time directly affects the definition, and a null value must be given, in this way the determination is ideal.

Keywords: SetPoint (SP), Process Variable (PV), Controlled Variable (CV).

ÍNDICE

I.	AGRADECIMIENTOS	5
II.	RESUMEN	6
III.	ABSTRACT	6
IV.	INTRODUCCIÓN	9
V.	PROBLEMA	9
VI.	JUSTIFICACIÓN	10
VII.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	10
	VII-A. Objetivo general	10
	VII-B. Objetivos específicos	10
VIII.	MARCO TEÓRICO	11
	VIII-A. Control	11
	VIII-A1. Planta	11
	VIII-A2. Sistema	11
	VIII-A3. Lazo abierto	11
	VIII-A4. Lazo cerrado	12
	VIII-A5. Controlador PID	12
	VIII-B. Control PID del Nivel de un tanque	14
	VIII-B1. Bomba de agua	14
	VIII-B2. Sensor de presión hidrostática	15
	VIII-C. Control ON/OFF de temperatura	15
	VIII-C1. Resistencia de calor	15
	VIII-C2. Termocupla	16
	VIII-C3. Controlador de temperatura	16
	VIII-C4. Contactores Industriales	16
	VIII-D. Autodesk Inventor	17
	VIII-E. PLC S7-1200	18
	VIII-F. Software TIA PORTAL	18
	VIII-F1. Bloque de programación PID Compact	18
IX.	MARCO METODOLÓGICO	20
	IX-A. Generalidades	20
	IX-B. Diseño de la investigación	20
	IX-C. Enfoque de la investigación	21
	IX-D. Población	21
	IX-E. Muestra y muestreo	21
	IX-F. Técnicas de recolección de datos	22
X.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN	22
	X-A. Descripción de la construcción y funcionamiento de la planta de tanques	22
	X-A1. Diseño grafico de la planta	22
	X-A2. Construcción de la planta	23
	X-A3. Programación para implementar el control	23
	X-A4. Análisis PID de la planta mediante el bloque PID_Compact	23
	X-A5. Diseño de una interface HMI	24

XI. RESULTADOS	24
XI-A. Identificación de valores PID	24
XI-B. Construcción de la planta didáctica	29
XI-C. Interfaz HMI	31
XI-D. Pruebas de procesos reales	35
XI-D1. Llenado y vaciado de los tanques	35
XI-D2. Agitación del líquido para la temperatura	36
XII. CRONOGRAMA	37
XIII. PRESUPUESTO	38
XIV. CONCLUSIONES	39
XV. RECOMENDACIONES	39
XVI. ANEXOS	41

IV. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo el desarrollo de un sistema didáctico de tanques, identificando valores óptimos de parámetros PID partiendo de la optimización fina que nos ofrece el software Tia Portal mediante un PLC S7-1200. Asimismo, los usuarios pueden modificar dichos parámetros mediante un HMI KTP 600, y analizar el cambio que puede tener la dinámica de la planta.

El problema enfocado de esta investigación radica en que la industria está creciendo, y se necesita tener conocimientos de ciertas áreas para tener un buen desempeño laboral. Una de estas áreas es el control PID de los procesos, y en las universidades este tema puede volverse confuso sin una práctica en un modelo didáctico. Tal es el caso de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, en la carrera de Ingeniería Mecatrónica, donde son escasas las plantas didácticas para entender cómo afecta el control PID a la estabilidad del sistema.

Es importante la implementación de este estudio, donde la planta didáctica permite la manipulación de los parámetros PID, porque así los usuarios pueden aplicar la teoría enseñada en clases en la planta didáctica. Las variables que se tienen en la planta didáctica son: el nivel de agua (controlada por control PID), y la temperatura del líquido (control ON/OFF). Con estas variables y tipos de control con sus diferentes actuadores y sensores, el estudiante tiene una mejor noción del área del control de procesos, y puede aplicarlo en la industria.

En el capítulo 12, está la revisión de la literatura acerca de los sistemas que se va a manejar a lo largo de esta tesis, y para la propia implementación de la planta didáctica. Como área principal de fundamento teórico está el "control". En el cual se desglosa subtemas de los cuales rigen la naturaleza del trabajo. Se describe el software de ingeniería e instrumentación que será utilizado para el desarrollo del trabajo de tesis.

En el capítulo 13, se describe la metodología y la solución propuesta, donde el diseño de la investigación descrita como experimental por el análisis de parámetros PID, será aplicada para generalizar los resultados a una población descrita como los sistemas que involucren el nivel y temperatura de líquido en la industria, a partir de la muestra que se materializa en la planta didáctica implementada.

En el capítulo 14, se muestran los resultados alcanzados como, la construcción de la misma planta, adecuación de la planta como material didáctico, criterio de valores de los parámetros PID, HMI para manipulación de los parámetros PID y funcionalidad de la planta didáctica. Estos resultados cumplen con los objetivos de este trabajo. En el capítulo 17 y 18, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante la realización de este trabajo. Las cuales se enfocan en la eficacia de la planta por los materiales que tiene, y sus recomendaciones para alargar la vida útil de cada uno de esos, también se recalca la funcionalidad de la planta didáctica alcanzada, y recomendaciones de los procesos a realizar.

Se anexa los planos de los elementos de la planta, circuito utilizado entre otros.

V. PROBLEMA

Desde la primera revolución industrial, los procesos de manufactura han ido cambiando con el tiempo, y fue en el siglo XX que se introdujo el control. Esto ha permitido el desarrollo industrial y crecimiento de la producción, en países como: Inglaterra, Francia, Alemania, Bélgica, Japón y Estados Unidos.

En la actualidad se habla de la industria 4.0, la siguiente revolución industrial, en donde las empresas que desarrollarían este modelo estarían vinculadas con la digitalización, internet de las cosas, coordinación digital, sistemas ciber físicos entre otros.

En este aspecto los países que llevan la ventaja son los desarrollados, mientras que los subdesarrollados aun no son conscientes de la importancia y los beneficios que esta nueva tecnología podría brindarles, tal vez porque hasta ahora no han tenido la necesidad de nuevas tecnologías [21] Y la necesidad no existe porque en la industria de los países en vías de desarrollo en Latinoamérica, no tienen las bases que pueden dar paso a esta siguiente etapa. Es necesario que se empiece por ese punto, ya que los avances tecnológicos son consecutivos y dependientes.

En Ecuador existen diversas industrias, las cuales tienen diversos procesos para la producción nacional, los cuales deben ser tomados en cuenta y analizados para su optimización. Si esto no ocurre el sueño de alcanzar los avances tecnológicos de hoy en día, no se podrá ejecutar en el país.

Es importante que los estudiantes en el área de ingeniería tengan herramientas que proporcionen conocimiento del ambiente laboral, para poder entender los cambios tecnológicos que trae el mercado [21]. De acuerdo a lo anterior, en el ámbito laboral se requiere muchas veces de conocimientos básicos y en otras ocasiones experiencia, por lo que los estudiantes no logran aplicar a dichos puestos debido a que no tienen una buena base en esta área, por lo que existe una pérdida de oportunidades laborales.

En la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, en la carrera de ingeniería Mecatrónica, son escasas las plantas didácticas que proporcionen la experiencia teórica práctica al estudiante de un proceso real de la industria. Y esto puede influir en el aprendizaje, creando un desinterés por entender la materia.

VI. JUSTIFICACIÓN

El control es muy importante en la automatización, y más aún para seguir desarrollando nuevas tecnologías en dicha área, la planta didáctica a desarrollar ayudará a los estudiantes a entender la materia de teoría de control y a generar interés por la misma.

Como lo hace notar [20], Alrededor del mundo son centenares los estudiantes que se ven obligados a dejar los estudios profesionales de carreras técnicas, debido a la complejidad de algunas materias, entre ellas las teorías de control, materias en la que es necesario un razonamiento teórico-práctico, que le permita lograr los conocimientos y habilidades para desenvolverse en su vida profesional (pág. 1).

Por esta razón se propone la construcción de dicha planta con la intención de ser un modelo didáctico para el estudio del control PID, el cual se basa en un sistema de tanques. Una interface HMI mostrará lo necesario para que el usuario sea capaz de manipular la planta.

Los proyectos son implementaciones, donde se debe aplicar el conocimiento, y el trabajo en equipo, esto simula una situación laboral que proporciona experiencia.[21]

De esta manera, enriqueceremos el conocimiento práctico en los estudiantes con las prácticas que se realicen en la planta didáctica a implementar. El desarrollo tecnológico en el Ecuador, también será afectado de manera positiva, ya que en la vida profesional las personas que usen la planta didáctica tendrán una mejor comprensión del control PID, y serán capaces de generar nuevas soluciones tecnológicas a la industria en el Ecuador.

Con lo anterior, podemos asegurar que el conocimiento en los estudiantes sobre el control PID, sea mejorado en la Universidad Politécnica Salesiana.

VII. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

VII-A. *Objetivo general*

Obtener una estabilización ideal, por medio de la identificación de valores óptimos del controlador proporcional, integral y derivativo, para el desarrollo de un sistema didáctico de tanques.

VII-B. *Objetivos específicos*

- Construir una planta didáctica necesaria para el desarrollo del proyecto.
- Realizar pruebas de procesos reales para el análisis del control PID de la planta y su funcionalidad.
- Adecuar el sistema didáctico de tanques, para que pueda ser utilizado como herramienta de aprendizaje.
- Implementar una interfaz que le permita al usuario modificar los parámetros de control de la planta.

VIII. MARCO TEÓRICO

VIII-A. Control

El control en la ingeniería ha permitido al ser humano crear sistemas robóticos, procesos de manufactura modernas, procesos industriales que requieran del control de sus variables de proceso.

El control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. [16]

Esto se puede desarrollar gracias al aporte de personas como: James Watt, Nicolas Minorsky, Harry Nyquist, W.R. Evan, Hazen, Ziegler y Nichols.

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo dieciocho. Minorsky, Hazen y Nyquist, entre muchos otros, aportaron trabajos importantes en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control [16] .

Por lo cual las teorías de control habituales que se han ido desarrollando son la teoría de control clásica (teoría de control convencional), teoría moderna de control y la teoría de control robusto.

La teoría de control clásica comprende el análisis de los sistemas de una sola entrada y una salida por ejemplo el control de la temperatura de un caldero (salida), con la llama proporcionada (entrada).

Como lo afirma Bernal, El control clásico es una teoría de control que se basa en el modelo del sistema, representado por un número de ecuaciones diferenciales lineales cuyos parámetros son conocidos. Este tipo de control es aplicable a sistemas lineales invariantes en el tiempo con una única entrada y una única salida (SISO: Single-input, Single-Output) [3, pág. 337].

La teoría de control moderno resolvió el problema de controlar varias variables aplicando lo que se denomina variables de estado, por ejemplo, el control de un automóvil moderno, hoy en día se cuentan con bastantes sensores en un automóvil para diversas variables. Así mismo plantea Bernal, “El control moderno sigue la tendencia de los sistemas de ingeniería a una mayor complejidad, y puede utilizar sistemas lineales o no lineales, invariantes en el tiempo y sistemas SISO o MIMO (Multiple-input, Multiple-Output)” [3, pág. 337].

La teoría del control robusto es el siguiente peldaño en el estudio del control, es más ambiciosa porque pretende no tener errores, entonces para evitar este inconveniente se define primero un rango de posibles errores, y después se diseña el controlador, de tal manera que, si se presenta un error del sistema definido en el rango, el controlador permanecerá estable. Desde el punto de vista de Bernal, “Las principales ramas de estudio en el control moderno son el control adaptativo, control robusto y control inteligente”[3, pág. 337]. Es decir, clasifica al control robusto como parte del moderno.

VIII-A1. Planta: Definiremos planta al conjunto de piezas a controlar.

Dicho con palabras de Pérez, se designará como planta a cualquier objeto físico que pueda ser controlado. Puede ser un equipo, quizás simplemente un juego de piezas de una máquina funcionando juntas, cuyo objetivo es realizar una operación determinada. Ejemplos de plantas son: horno de calentamiento, reactor químico, etc. [18, pág. 6].

VIII-A2. Sistema: Es el entorno general, en donde hay componentes relacionados entre sí para cumplir un objetivo.

Dicho con palabras de Pérez, de forma más general, podemos definir a un sistema como un arreglo, conjunto o combinación de cosas conectadas o relacionadas de manera que constituyen un todo. De forma científica podemos definirlo como un arreglo de componentes físicos conectados o relacionados de tal manera que formen una unidad completa o que puedan actuar como tal; en otras palabras: Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente, con un determinado objetivo a cumplir [18, pág. 7].

VIII-A3. Lazo abierto: Un sistema de lazo abierto se caracteriza por no tener una retroalimentación de la salida, y debido a eso no se puede controlar de manera automática el proceso, ya que no existe una comparación de la salida y la entrada también llamada referencia. Desde el punto de vista del autor corporativo Obra Colectiva Edebe, “En este tipo de sistemas, el ciclo que se realiza está prefijado y no se ve modificado por el resultado del proceso, tanto si es correcto como si no lo es” [15, pág. 180]. Y esto se da porque no hay una retroalimentación

de la salida. En la Figura 1, se muestra el sistema de lazo abierto, se puede observar que a la entrada no existe ninguna retroalimentación, por ende, no existe una comparación.



Figura 1. Bloques conectados en serie.

Un ejemplo de un sistema en lazo abierto es una lavadora doméstica. Según [12], “El ciclo de remojo, lavado y enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida que es el grado de limpieza de la ropa” (pág. 14).

Consideraciones a tomar en cuenta:

- “La precisión de los sistemas de lazo abierto depende directamente del conocimiento de la planta para lograr una calibración adecuada del controlador” [12]. Es decir, no existe automatismo para sintonizar bien el controlador del sistema para obtener la salida deseada, si no que debemos basarnos en el método de prueba y error para afinar dicha precisión con la que se llega a la salida deseada.
- “Los sistemas de lazo abierto no presentan problemas de inestabilidad” [12].

VIII-A4. Lazo cerrado: Un sistema de lazo cerrado tiene retroalimentación de la salida, es decir existe la comparación entre la salida y la entrada, esta comparación es llamada error el cual es tratado por un controlador PID, para corregir estos errores, y así el sistema funcione de manera óptima. [15] da a conocer que “En ellos, a diferencia de los sistemas en lazo abierto, existe un sensor capaz de regular el mecanismo de control en función de la respuesta del sistema” (pág. 181). De esta manera la precisión de la salida deseada, es controlada y se lo puede implementar de manera automática basada en la retroalimentación. En la Figura 2, se puede observar la retroalimentación de la salida siendo comparada, y obteniendo un error que posteriormente será procesado para atenuarlo.

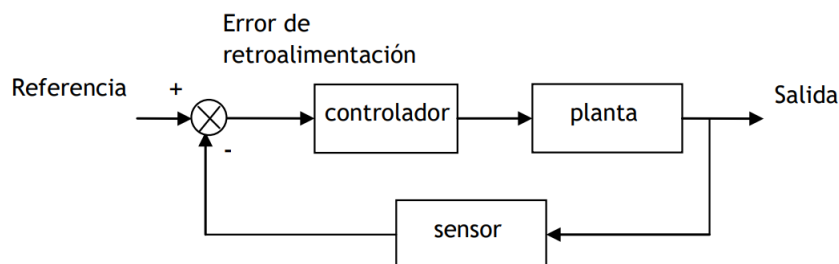


Figura 2. Sistemas de bloque en retroalimentación siendo así un sistema de lazo cerrado

VIII-A5. Controlador PID: El controlador PID tiene como objetivo atenuar el error de estado estacionario de un sistema, y lo hace mediante la sintonización de tres parámetros: proporcional, integral y derivativo. Estos parámetros son ganancias y varían dependiendo del análisis de la respuesta en frecuencia y el lugar de las raíces del sistema a controlar.

Dicho con palabras de [13], Un controlador PID fundamenta su funcionamiento en la sintonización de tres constantes, una ganancia proporcional K_P , una ganancia de tipo integral K_I (o tiempo integral T_i), y una ganancia derivativa K_D (o tiempo derivativo T_d), que en conjunto tienen como objetivo reducir el error en estado estable de un determinado proceso tomando información del mismo error tanto en el tiempo presente, como de los errores previos, y anticipándose a los errores futuros. (pág. 8) En la Figura 9, se ilustra la retroalimentación de la salida, el cual se compara con la referencia para estimar el error de estado estacionario, dicho error es corregido por los parámetros del controlador PID. Cabe mencionar que la referencia y la señal de retroalimentación deben ser de la misma naturaleza.

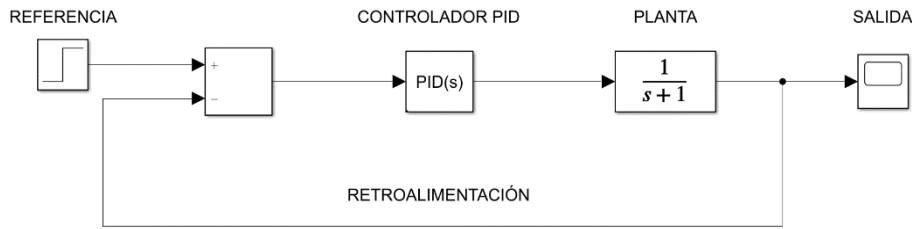


Figura 3. Ejemplo de un sistema en lazo cerrado con controlador PID

Los parámetros actúan en base a una ecuación del PID, que define que el error será atenuado en base a los antecedentes y pronósticos del mismo error. Por ejemplo, el parámetro proporcional (P), es la acción que se toma en el mismo instante, el parámetro integral (I), se basa en el historial del error que ha tenido el sistema y el parámetro derivativo pronostica cual sería el error futuro del sistema. En la Ecuación 4, se puede observar la ecuación de la cual se habla.

En la Figura 10, se muestra una gráfica de la evolución del error, en un plano error vs tiempo, en el cual se evidencia como actúa los tres parámetros del PID, es decir la acción proporcional (presente), la acción integral usa los datos pasados del error mediante la integral, y la acción derivativa predice cual será el error futuro mediante la derivada del mismo error.

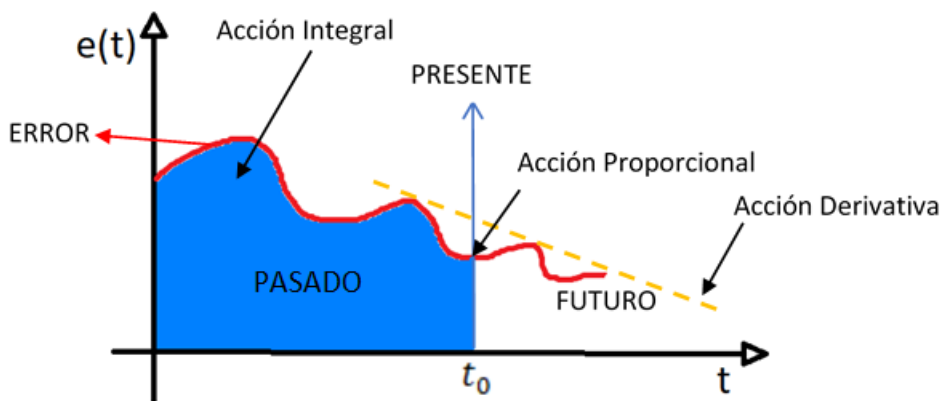


Figura 4. Se ilustra el comportamiento de las ganancias PID a través del tiempo.

Existen dos tipos de controladores PID, analógico y digital. Según [14], “Un CONTROLADOR ANALÓGICO consiste en un dispositivo que realiza cálculos requeridos para el control de un sistema de una manera analógica, sin discretizar la señal de control para su procesamiento en una computadora o microcontrolador”, “Otro elemento fundamental de estas tecnologías es el AMPLIFICADOR OPERACIONAL , el cual permite realizar cálculos aritméticos básicos con circuitería analógica” (pág. 20).

Por otro lado sobre los controladores digitales, [14] argumenta que “Dichos controladores convierten la señal analógica a digital vía un convertidor ADC (Analog to Digital Converter) para su procesamiento con un microprocesador o computadora y, si fuese requerido, regresan la respuesta como una señal continua al proceso mediante un convertidor DAC (Digital to Analog Converter)” (pág. 20).

VIII-B. Control PID del Nivel de un tanque

Un ejemplo es el control de nivel de líquido.

Para medir el nivel de líquido se emplea un dispositivo analógico conocido como sensor de presión, la información generada por dicho dispositivo es tratada por medio de un acondicionador de señal y convertida a un formato digital a través de una interfase para ser registrada por una computadora, en ella se compara la altura del nivel de líquido medida con la programada o deseada. La diferencia que existe entre ellas se le conoce como el error, el cual es convertido en un valor analógico a través de una interfase y acondicionado para ser utilizado por una etapa de potencia que permite la apertura o cierre proporcional de la válvula, logrando con ello la disminución o el aumento del caudal hacia el depósito, esta acción modifica el nivel del líquido. El proceso se repite hasta que la salida sigue a la referencia [12]. En la figura 5, se puede observar un diagrama del proceso que se describió.

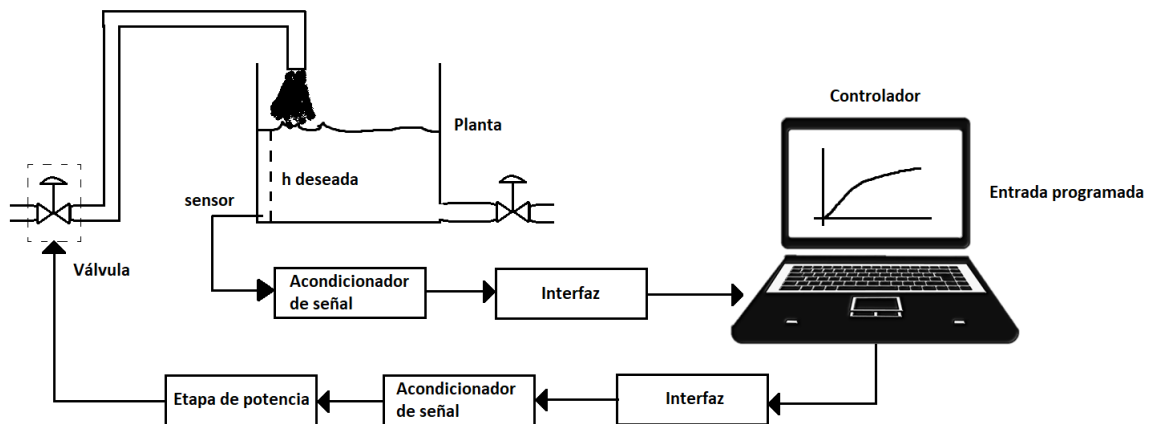


Figura 5. El control de nivel tiene dichas etapas que se ilustra, el computador envía y recibe las señales que son necesarias para el control

Consideraciones a tomar en cuenta:

- “El diseño apropiado de los sistemas de lazo cerrado generalmente incrementan la precisión por esta razón su funcionamiento es conforme al valor deseado” [12]. Es decir, un sistema en lazo cerrado es manejado solo con la entrada para tener una salida deseada, porque el trabajo de regulación ya lo hace un controlador basado en la retroalimentación, que previamente ya ha sido configurado.
- “Una ventaja del control de lazo cerrado es que es relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas de parámetros del sistema” [12].
- “Desafortunadamente si un sistema de lazo cerrado no está bien diseñado, este puede tender hacia la inestabilidad. Por otra parte, la estabilidad es la función principal en el sistema de control de lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir errores en exceso que producen oscilaciones de amplitud constante o variable” [12]. Esto significa que, si el controlador que corregirá los errores del sistema, previamente fue mal diseñado, en la implementación el sistema puede ser inestable.

VIII-B1. Bomba de agua: Las bombas de agua son utilizadas frecuentemente en el diario vivir de las personas, uso doméstico para aspiración de agua a tanques elevados, para aumentar la potencia de agua potable a una población, para administrar agua de un pozo a una envasadora de bidones de agua, en fin, las bombas de agua juegan un papel importante en para uso doméstico e industrial. Su funcionamiento se basa en un motor interno que permite la absorción para posteriormente impulsar el líquido, ya sea bomba periférica o centrífuga las dos cumplen dichas fases.

Citando a [19], Las Bombas son Generadores Hidráulicos. Absorben energía mecánica en el eje y proporcionan energía hidráulica a un líquido que bombean por una tubería (con accesorios). Su aplicación es muy diversa, para la impulsión de toda clase de líquidos. (pág. 4)

En si hay dos fases en el funcionamiento de una bomba de agua, la aspiración, donde la bomba genera un vacío

en la tubería de aspiración para que el líquido ingrese por diferencia de presión, y la fase de impulsión, que básicamente es el traslado del líquido por la tubería de salida. En la Figura 6, se muestra una bomba centrífuga donde se muestra la aspiración e impulsión.



Figura 6. Bomba de presión (80Psi). Fuente: [24]

VIII-B2. Sensor de presión hidrostática: El transmisor de presión adopta un chip sensible a la presión de alto rendimiento con enrutamiento avanzado, de compensación térmica. El cambio de presión se convierte en una corriente lineal. De 4 a 20 miliamperios. [25]

En la Figura 7, se puede observar el sensor de presión hidrostática.



Figura 7. Sensor de presión hidrostática. Fuente: [25]

VIII-C. Control ON/OFF de temperatura

Es la forma más simple de controlar la temperatura, porque el actuador se activará cuando la medición este por debajo del setpoint, y se detendrá cuando llegue a él.[17]

Normalmente se usa un diferencial ON/OFF, para evitar cambios rápidos en un ciclo continuo, o para resetear el proceso en sistemas de una sola acción. [17]

VIII-C1. Resistencia de calor: Las resistencias de calor o calefactoras, son elementos conductores de alta resistencia, que no permite la libre circulación de corriente. A consecuencia de esto genera calor por los choques de los átomos de la corriente y del material de la resistencia.[11]

Con respecto al material que están hechas estas resistencias, lo más común es que tengan una aleación de níquel y cromo para soportar altas temperaturas de hasta 1000 °C. Otras resistencias de níquel y cromo son cubiertas con cerámica, y con acero inoxidable. Estas resistencias no se oxidan y mantienen el calor por más tiempo, pueden

categorizarse como resistencias de inmersión.[11]

En la Figura 8, se muestra una resistencia de inmersión, la cual funciona con el contacto directo con el líquido.[4]

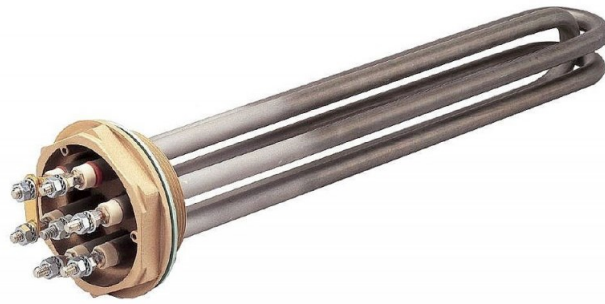


Figura 8. Resistencia de inmersión. Fuente:[4]

VIII-C2. Termocupla: Las termocuplas son sensores para medir temperatura, estos generan un voltaje dependiendo de la temperatura que miden. [9]

En la Figura 9, se muestra una termocupla bayoneta tipo “J”.



Figura 9. Termocupla bayoneta tipo J. Fuente:[7]

VIII-C3. Controlador de temperatura: Estos controladores funcionan con una entrada de sensor tipo termopar, y una salida para algún actuador. Los sistemas que poseen un controlador dedicado a la temperatura permite el monitoreo de la precisión de la temperatura. Estos controladores pueden tener tres tipos de control: control ON/OFF, control PID y control Proporcional.[10]

En la Figura 10, se muestra un controlador de temperatura.

VIII-C4. Contactores Industriales: Los contactores nos ayudan a poner en marcha diferentes cargas, normalmente de una potencia elevada. Este se activa mediante mecanismos de electroimanes, permitiendo que se cierren y activen sus contactos para el funcionamiento deseado. Estos contactores industriales soportan un amplio rango de voltaje para ser comandados, en Vac (24Vac – 400Vac) y en Vdc (24Vdc – 220Vdc).[6]

En la Figura 11, se muestra un contactor industrial CHNT.



Figura 10. Controlador de temperatura. Fuente:[8]



Figura 11. Contactor industrial CHNT. Fuente:[6]

VIII-D. Autodesk Inventor

Este software permite diseñar piezas digitales en 3D, también permite hacer un análisis estructural de dicha pieza o conjunto mecánico, si se trata de un ensamble, ya que las piezas diseñadas en este software se pueden ensamblar para crear un solo conjunto, además Inventor cuenta con la interface de generar las vistas de las piezas diseñadas, lo cual permite hacer planos con normativas de acotación. Según [5], “Autodesk® Inventor® proporciona un conjunto exhaustivo de herramientas de CAD de mecánica 3D para producir, validar y documentar prototipos digitales completos” (pág. 1).

Con este software se puede crear prototipos antes de la fabricación de estos, de esa manera nos ofrece un previo análisis de la dinámica, resistencia y diseño. Como lo hace notar [5], “El prototipo ayuda a visualizar, simular y analizar el funcionamiento de un producto o una pieza en condiciones reales antes de su fabricación” (pág. 1). En la Figura 12, se muestra la interface del inicio de Inventor Autodesk, en el cual podemos elegir entre: pieza, ensamble, dibujo y presentación.



Figura 12. Logo de Inventor Autodesk. Fuente:[5]

VIII-E. PLC S7-1200

El controlador S7-1200 ofrece la flexibilidad y potencia necesarias para controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas necesidades de automatización. Gracias a su estructura compacta, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, el S7-1200 es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones.

La CPU combina los siguientes elementos, además de otros, en una caja compacta para crear un controlador potente: Un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, PROFINET incorporado, E/S de Motion Control rápidas. [22]

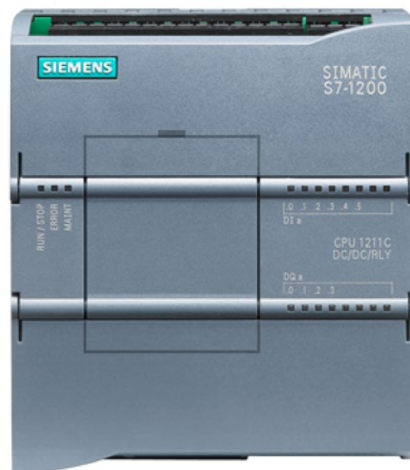


Figura 13. Autómata programable S7-1200. Fuente: [22]

VIII-F. Software TIA PORTAL

El Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) permite el acceso completo a toda la automatización digitalizada, desde la planificación digital y la ingeniería integrada hasta la operación perfecta. Como parte del Digital Enterprise Software Suite, se une a PLM y MES en completando la oferta integral de Siemens para empresas en camino hacia la Industria 4.0, lo que lo convierte en el acceso perfecto a la automatización en el Empresa digital. En la Figura 14 se ilustra la interface de programación para controladores.

VIII-F1. Bloque de programación PID Compact: Dentro de los bloques de funciones del software de programación TIA Portal, existe el bloque PID Compact, el cual permite la regulación PID, y tiene una optimización interna que se basa en un lazo de control donde mide el valor real del proceso, y el set point deseado. El error entre estos dos valores es un dato que toma este bloque para calcular la salida y atenuarlo, cumpliéndose así el fin del control PID. [23]

Existen tres tipos de salidas para este bloque: Out PER, Output, Out PWM. Los cuales entregan señales de 0 a 10 V - 4 a 20mA, valores en rangos porcentuales para dispositivos que pueden ser no lineales, y señales de



Figura 14. Logo del software TIA PORTAL

pulsos (PWM) respectivamente. Este último solo es posible en dispositivos PLC de categoría DC/DC/DC, ya que las salidas digitales para regulación por pulsos, debe ser salida a transistor y no de relé (AC/DC/Rly). [23]

En la Figura 15, se puede observar el bloque PID compact con las entradas como el Setpoint deseado, “Input” para la lectura real del proceso, “Input PER” lectura en un rango de (0 – 10V, 4 – 20mA). “Manual Enable” trabaja como un interruptor del bloque, “ManualValue” es activo solo si el bloque se configura en modo manual y no automático, también tenemos “Reset” para inicializar nuevamente el bloque, ya que este tratará de encontrar los valores PID desde su sintonización, si por algún motivo se quisiera cambiar de sistema habrá que resetear el bloque.

En el lado de las salidas (lado derecho), tenemos: “ScaledInput”, el cual es el valor real medido del sistema, ya sea por medio de un sensor si se trata de la entrada Input PER. También tenemos “Output”, “Output PER” y “Output PWM que son las salidas ya antes explicadas. Existe un apartado de indicadores de rangos limites como “SetpointLimit H”, “InputWarning H”, InputWarning L”. Estos son alarmas de altos (H) y bajos (L) valores que se estén dando en el bloque por algún motivo. [23]

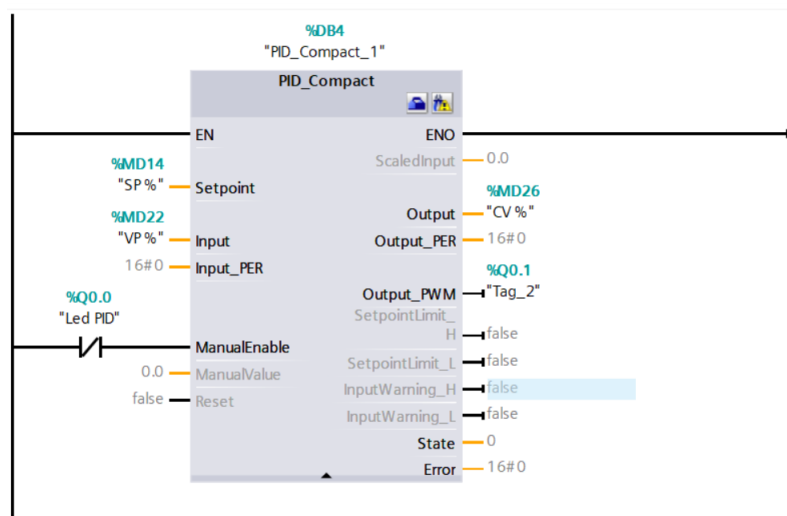


Figura 15. Bloque PID Compact

El sistema bloque PID Compact, se muestra en la Figura 15. Donde (W) es el Set point deseado donde entra a un bloque “b” que corresponde a la ponderación de la acción P, también se bifurca hacia una diferencia con “ScaledInput” (x), el cual como se había explicado esa comparación da como resultado un error. Esta etapa se realiza tres veces, si se observa hay tres puntos de sumas (donde se hace la diferencia del set point con el valor medido “ScaledInput”), antes de llegar al punto suma que agrupa los resultados de los parámetros estimados para la corrección del error, para que una ganancia proporcional (Kp) los ejecute para el sistema, dando así un valor de

salida del algoritmo PID “y”. [23]

En el subsistema “Anti Windup” se encuentran dos bloques. El bloque “LIMIT”, mantiene los valores dentro de un rango establecido en la configuración del bloque PID Compact. Por otro lado, está el bloque I, el cual pertenece a la acción integral del bloque. Estos bloques actúan sobre el error medido en las señales de Set point y ScaledInput sin ser tratadas por ningún bloque.

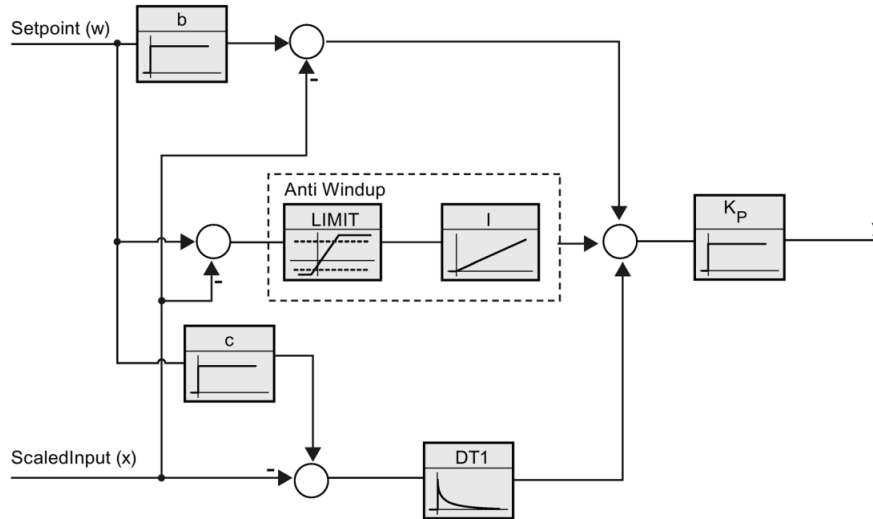


Figura 16. Sistema de bloques del PID Compact

IX. MARCO METODOLÓGICO

IX-A. Generalidades

Para alcanzar lo estipulado por el investigador y así mismo cumplir las expectativas de los objetivos de la investigación, se deberá realizar actividades que permitirán hacer de la investigación un conocimiento para la comunidad científica. Dichas actividades forman parte del marco metodológico, las cuales son: el diseño de la investigación, muestra a estudiar, la estrategia, los métodos, técnicas para el análisis de la información y criterios para la calidad del trabajo entre otros. Así el marco metodológico analiza a fondo el problema de investigación para su solución, y es la aplicación algorítmica de las bases teóricas, del trabajo que se esté realizando es decir del marco teórico, por esta razón el marco metodológico no puede ser realizado antes del marco teórico. El diseño de la investigación puede ser tanto cualitativo, es decir se espera resultados subjetivos, donde se pueden abrir nuevos temas de investigación conforme a opiniones, por otro lado, el diseño puede apuntar al otro paradigma llamado cuantitativo, en donde el estudio se basa en estadísticas, y los resultados se generalizan y se obtiene inmediatamente los resultados. [2]

IX-B. Diseño de la investigación

El objetivo del estudio dicta que se obtendrán los valores óptimos PID para la estabilización del nivel, con el fin de implementar una planta didáctica. Por lo cual se usará el diseño experimental para el desarrollo de este trabajo.

La investigación experimental se basa en una manipulación, intervención por parte del investigador, manipulando alguna variable, para después ver sus resultados, es decir su efecto – causa. [26]

IX-C. Enfoque de la investigación

Dado que el análisis de los parámetros PID, conlleva la manipulación de variables, y a su vez estas cambian el comportamiento de la planta, se puede deducir que el enfoque de la investigación será de carácter cuantitativo. La teoría en la que se fundamenta el control, es aplicada en la experimentación, y permite observar el fenómeno descrito en la realidad. Por parte del control el fenómeno físico, como la temperatura y el nivel de líquido, pueden cambiar manipulando los parámetros PID descritos. Y en base a su análisis se puede generalizar un conjunto de parámetros para un comportamiento deseado en la planta.

Como se dijo la generalización de los resultados permite trabajar con poblaciones grandes, la información obtenida es considerada como tangibles, fidedignos y rigurosos a consecuencia de esto, la precisión de este enfoque es alta. Dicho enfoque se lo realiza cuando hay suficiente fundamento de conceptos a analizar. De esa manera esta metodología no se centra en explicar un fenómeno, sino que busca información estadística a partir de una población, para luego obtener conclusiones a partir de esa información. [2]

IX-D. Población

La población también llamada universo, trata del conjunto de identidades no estrictamente humanas, pueden ser laboratorios, documentos, animales, objetos, organizaciones, expedientes etcétera, de los cuales se analizará en un estudio de investigación. Pues de esta población, se obtendrá una muestra, para el respectivo estudio, por esta razón la población debe ser homogénea entre sus elementos que lo conformen, esto es necesario para permitir la generalización basado en la muestra de la población y no cometer conclusiones erróneas. La población tiene su propia temporalidad, en donde se indica el periodo en el que existe esta población, es decir si es una población del pasado, o presente, ya que por el tiempo las poblaciones pueden tener cambios como en el pensamiento, habilidades, entre otros. También la población tiene su limitación espacial, es decir de qué región, país, comunidad, etcétera, se realizará el análisis. [1]

Entonces con base a lo anterior, la población de esta investigación serán los sistemas que involucren variables de temperatura y de nivel controlada por un algoritmo PID, (mediante un PLC s7-1200).

Estos sistemas están de manera constante a lo largo del tiempo en la industria, y es la base para etapas consiguientes de automatización. Es decir son importantes para el mejoramiento de procesos. La población escogida tiene como localidad en la industria no desarrollada a nivel de automatización, ya que en este proyecto trata de buscar la optimización y entender el como puede afectar los parámetros del control PID en dichos procesos.

IX-E. Muestra y muestreo

Se usa una muestra para la investigación, porque permite ahorrar tiempo, ya que al estudiar a un menor número de elementos se gasta menos tiempo, debido a esto los recursos se ahorran. Estudiar a todos los elementos de la población sería una tarea imposible, por lo que se acude a una muestra. Entonces en un trabajo de investigación no se tomará la población para su estudio sino una muestra de ella como se ha venido recalando. [1]

La muestra en este proyecto se materializará en la construcción de la planta didáctica, y será la representación de los procesos que se pueden llevar a cabo en la industria.

Los métodos de muestreo que existen son los probabilísticos y no probabilísticos, y sirven para escoger que elementos de la población (humanos, animales, documentos, etcétera) irán en la muestra, depende del conocimiento de la población y el enfoque del investigador para decidir cuál usar. Por ejemplo, si de la población se sabe que todos pueden ser escogidos para formar parte de la muestra por la homogeneidad que tienen, se puede aplicar el método probabilístico, y su elección puede ser al azar, los resultados y conclusiones se pueden generalizar con la población. Por otro lado, si de la población se sabe muchas características de ella, y el investigador quiere aprovechar esas características para clasificar la muestra, entonces se usará un método no probabilístico, aquí la elección no es al azar, sino que responde al enfoque que necesite el investigador, como consecuencia de esto los resultados y conclusiones no se pueden generalizar con su población. [1]

El muestreo no probabilista, nos permitirá escoger de toda las variables industriales, las que son mas comunes y estén presentes en la planta didáctica de este proyecto (temperatura y nivel controlado por algoritmo PID).

IX-F. Técnicas de recolección de datos

Son las herramientas que se usan para obtener información, las cuales por el investigador se puede realizar un sistema de recolección de datos, mediante encuestas, entrevistas, la observación, diccionario de datos y diagramas de flujo. La herramienta será seleccionada por el investigador y la pondrá en práctica cuando su trabajo de investigación requiera de información útil. [26]

Para el desarrollo de este trabajo se usará la observación y experimentación como técnica de recolección de datos. De esa manera se analiza los parámetros que debe tener la planta para el funcionamiento deseado.

X. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

X-A. Descripción de la construcción y funcionamiento de la planta de tanques

Las fases necesarias para llevar a cabo este trabajo son:

1. Diseño gráfico de la planta.
2. Construcción de la planta.
3. Programación para implementar el control.
4. Análisis PID de la planta mediante el bloque PID_Compact.
5. Diseño de una interface HMI.

X-A1. Diseño gráfico de la planta: La propuesta de la planta se realizó en el software de dibujo asistido por computadora (CAD), Inventor de la empresa Autodesk, en el que se usaron las herramientas de dicho programa para pre visualizar la estructura en la que se va a implementar la planta didáctica, de esa manera dimensionar y elegir los materiales necesarios. En la Figura 17, se ilustra el diseño gráfico que se realizó para la planta, donde hay dos tanques de control, el tanque (1) para la temperatura y el tanque (2) para el nivel del líquido.

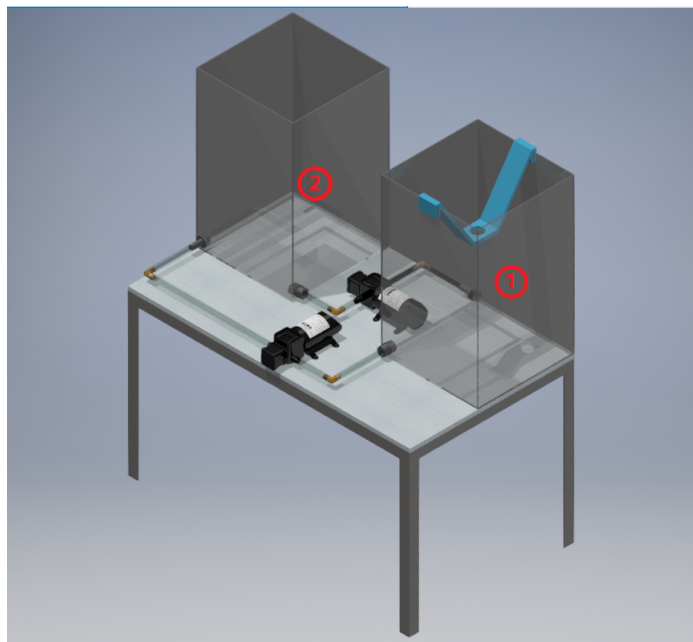


Figura 17. Diseño gráfico de la planta. Fuente: Los autores

En la Figura 18, se visualiza el conducto de tubería que traslada el líquido caliente previamente controlado por el tanque (1), al tanque de control de nivel. Una bomba (2) proporciona la fuerza suficiente para mover el líquido. De igual manera para el vaciado del tanque.

En la Figura 19, se observa el diseño del soporte propuesto para la resistencia de calor, donde se sostiene de las paredes del acrílico permitiendo sumergir la resistencia en el líquido.

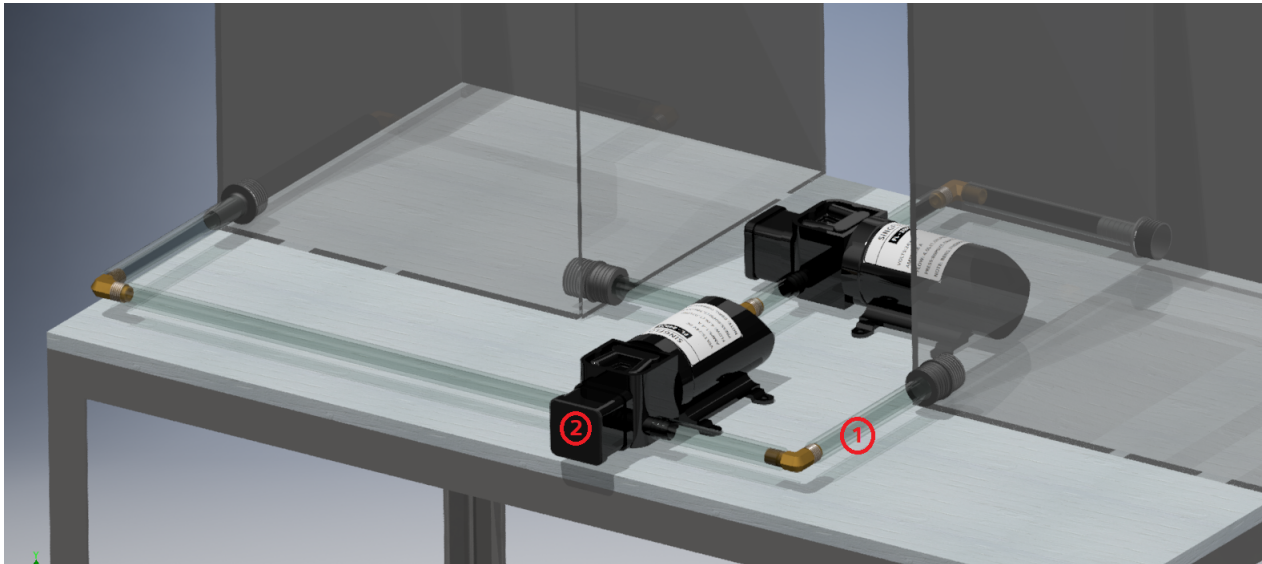


Figura 18. Diseño del conducto de alimentación de tubería

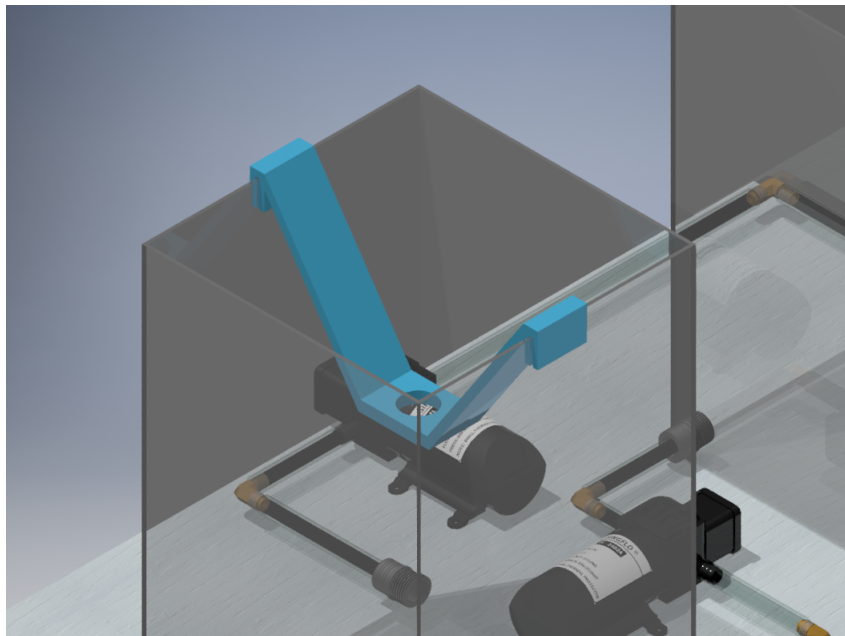


Figura 19. Soporte de la resistencia de calor. Fuente: Los autores.

X-A2. Construcción de la planta: Para la construcción de la planta se propuso perfil en ángulo metálico para la estructura, madera para la base donde se asientan los tanques y bombas. El material propuesto para los tanques del proyecto, es acrílico de 4mm, y las tuberías de la planta didáctica es manguera flexible de ¼ de pulgada.

X-A3. Programación para implementar el control: Se procederá a programar el controlador PLC S7-1200, en lenguaje ladder en el software TIA PORTAL, en el cual existe un bloque de control llamado “Pid_compact”, donde se puede poner los valores de las ganancias previamente analizadas para dar paso al análisis de su funcionamiento.

X-A4. Análisis PID de la planta mediante el bloque PID_Compact: Con la programación en funcionamiento, el bloque PID_Compact permitirá hacer un ajuste de los parámetros de manera automática. De esta manera, tenemos la planta con el comportamiento que el PLC S7 – 1214C AC/DC/Rly le esta dando.

Los cambios en los parámetros PID y su efecto en el comportamiento en la planta (tiempo de estabilización, dinámica, estabilidad, etcétera) serán anotados para su respectivo análisis.

X-A5. *Diseño de una interface HMI*: Se crea una interfaz para la visualización del proceso, en donde el set point, marcha y paro y parámetros PID, serán manipulables.

XI. RESULTADOS

XI-A. *Identificación de valores PID*

Los valores se obtuvieron mediante el bloque PID_Compact. El cual nos permite sintonizar los parámetros en base a la entrada del sistema (Variable de proceso) y la consigna deseada (Set Point). En la figura # se muestran los resultados obtenidos para este objetivo.

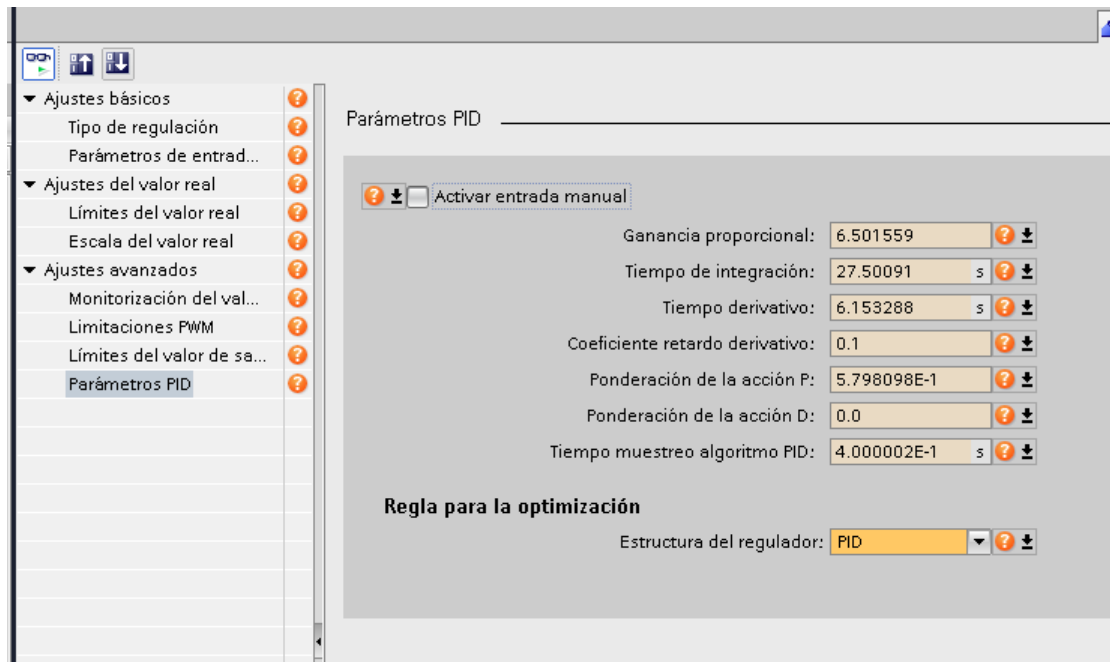


Figura 20. Valores de los parámetros PID obtenidos mediante la afinación del bloque PID_Compact.

El bloque para encontrar dichos valores, varía la salida controlada de manera constante alrededor del set point del sistema.

En nuestra sintonización el setpoint fue ubicado en 71 % de llenado. El tiempo que duro la optimización fina fue aproximadamente de 6 min, mientras la salida PID alternaba las bombas de llenado y vaciado de nivel.

En la Figura 21, se muestra la ventana del proceso de optimización donde en la esquina superior derecha de la gráfica, existe una leyenda que nos indica que señales están graficadas. De color negro es el setpoint del sistema, en verde la señal medida por el sensor, y en color rojo la acción PID para compensar el error (1). En el estado del regulador nos muestra el setpoint, la entrada (medición del sensor), y la salida PID, el cual varía para la optimización de los parámetros (2). Finalmente se puede observar el progreso y estado de la optimización (3).

En la Figura 22, se muestra los parámetros que se obtuvo de la optimización fina del bloque PID_Compact, ingresados en el HMI.

En la Figura 23, se muestra la gráfica del proceso, y la actuación del control PID, con un set Point del 25 %. Se puede observar la acción del control PID con las pendientes que nos muestra la grafica de color azul. Donde el llenado tiene una pendiente pronunciada, la cual como efecto enciende la bomba de llenado a un aproximado de su flujo de trabajo, y al contrario de la pendiente descendente que controla la bomba de vaciado para mantener el nivel, es mas suavizada, esto permite que la bomba actúe a un flujo menor. Permitiendo la estabilización del nivel con ciclos de subida y bajada de nivel hasta mantener la consigna.

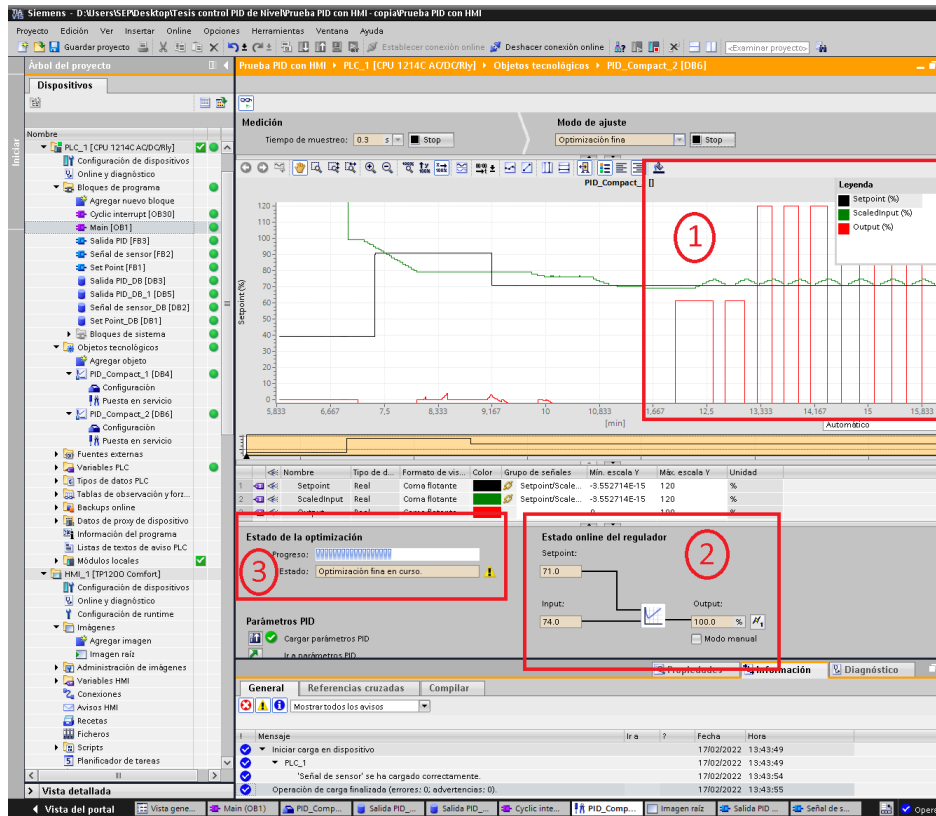


Figura 21. Proceso de optimización de los valores PID con el PID_Compact.

Con los valores mostrados de parámetros PID la planta se estabiliza con oscilaciones después de un tiempo. Luego empieza a dar valores PID nuevamente, haciendo que busque de nuevo el setpoint, porque el nivel cambia, y de esa manera se mantiene en un lapso de tiempo.

En la Figura 24, se puede ver el historial del control PID para la planta didáctica, y se puede apreciar ese cambio que tiene después de ya haber estabilizado el nivel el control.

El parámetro derivativo del controlador se dispara para corregir un error que se producirá en un supuesto tiempo, como se explica en la fundamentación teórica, este parámetro usa la derivada del error, es decir traza una tangente que se proyecta valores de error futuros, y trata de evitarlos aplicando su valor. Sin embargo, este error puede no presentarse y entonces la corrección aplicada genera otro margen de error, y así permanecerá hasta que el error se atenúe en un largo periodo de tiempo. Este fenómeno se lo puede apreciar en el comportamiento anterior con los parámetros PID establecidos.

El ruido del sensor por la baja precisión que tiene, puede ser otro factor para que el parámetro derivativo produzca esas oscilaciones producidas por una estimación errónea como se explicó, ya que normalmente una señal de un sensor oscila entre valores y esto afecta al parámetro derivativo.

En la Figura 25, se puede observar que el parámetro derivativo ha sido puesto a 0.1, esto con el fin de dejar sin efecto a este parámetro.

En la Figura 26, se muestra el comportamiento que tiene la planta, con el parámetro derivativo disminuido. Se puede observar que la acción del controlador es menor a la que teníamos con los valores anteriores de PID.

de



Figura 22. Valores de la optimización fina, ingresados en el HMI.

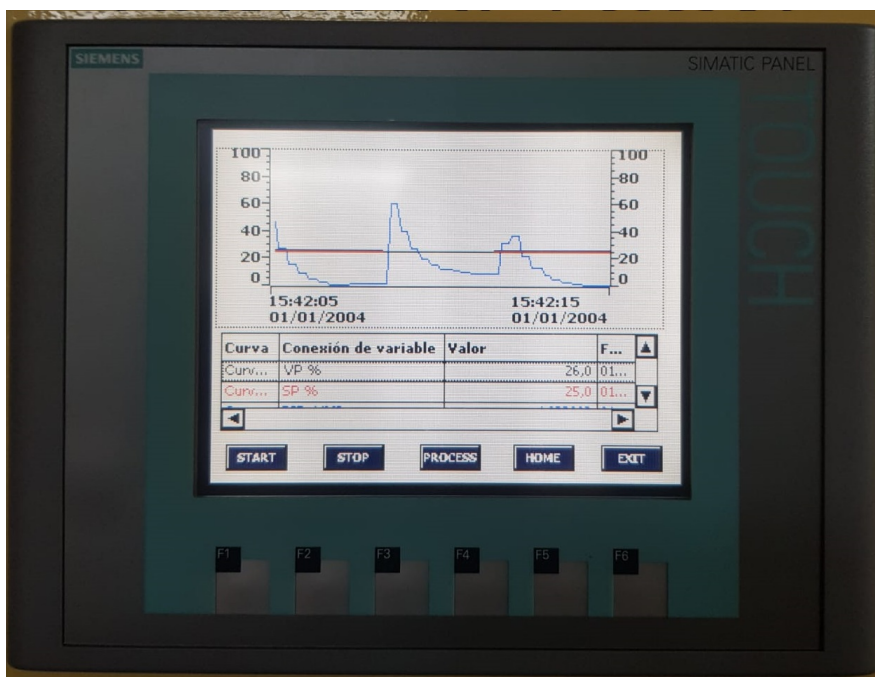


Figura 23. Grafica de la planta y el control PID optimizado en el HMI. Fuente: Los autores.

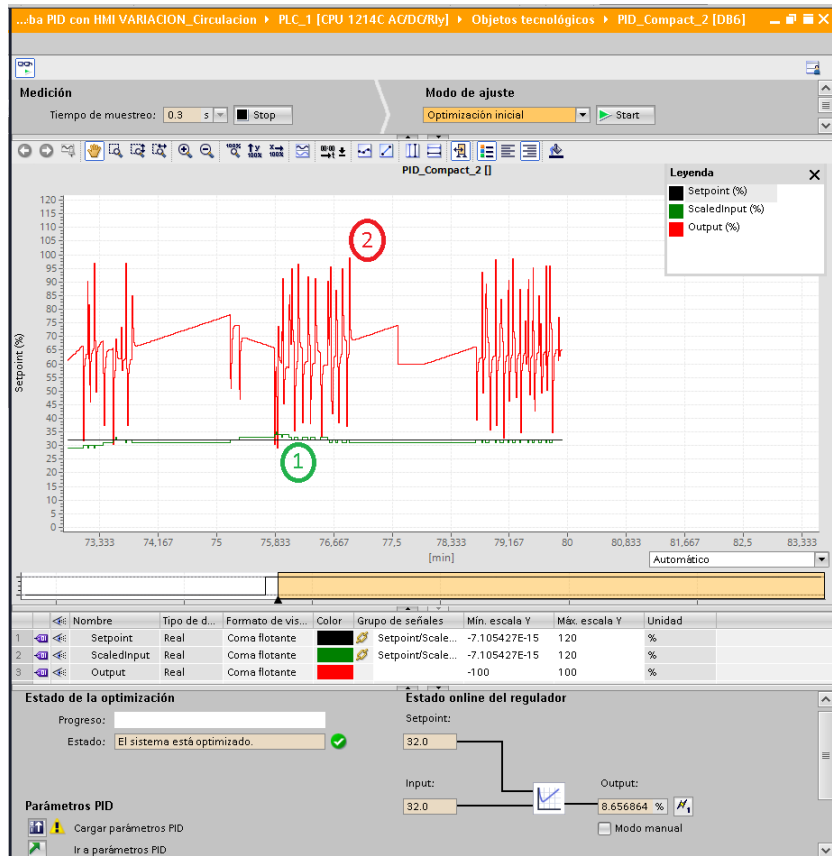


Figura 24. Grafica de la dinámica de la planta con el control PID visualizado en TIA PORTAL. Fuente: Los autores.



Figura 25. Parámetro derivativo disminuido. Fuente: Los autores.

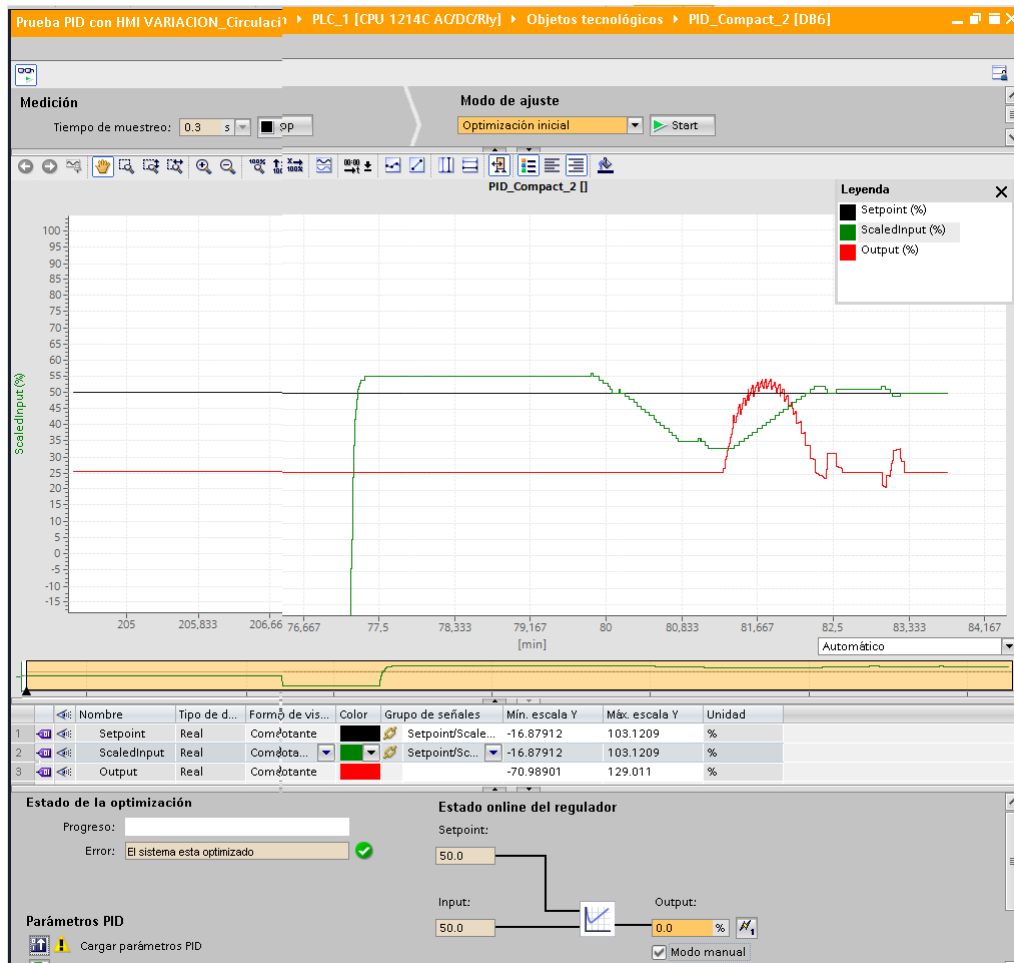


Figura 26. Comportamiento de la planta con el parámetro derivativo disminuido. Fuente: Los autores.

XI-B. Construcción de la planta didáctica

Para la construcción de la planta didáctica se implementó una estructura de metal con base de madera, en el cual nos permitirá ensamblar los elementos que la conforman.

La estructura de metal esta realizada con perfiles en "L" de lados iguales (3cm x 3cm). En la Figura #, se muestra dicha estructura.



Figura 27. Estructura de metal.

Se adecuo una tabla de espesor (40cm x 60cm x 1,5cm), para dar soporte a las bombas y tanques de agua. En la Figura # se muestra las adecuaciones para la mesa.

Las bombas se colocaron en medio de la mesa, para la circulación del agua por la parte inferior de los tanques de acrílico. Las mangueras son de ¼", y los codos de igual manera. En la Figura 28, se muestra el enrutamiento de las tuberías con las bombas de agua hacia los tanques.



Figura 28. Enrutamiento de las tuberías. Fuente: Los autores.

Para el sensor de temperatura se diseño un soporte para la resistencia de calor, y así poder ubicarlo en la parte superior del tanque de temperatura. En la figura#, se muestra el soporte impreso en 3D, con un filamento PLA.

Se necesito un área para poner los implementos necesarios para el funcionamiento de las bombas de agua y la resistencia de calor, entonces se decidió hacer una subbase con soporte de metal, y proteger los alrededores de la mesa para evitar que entre cualquier residuo de agua. Figura#.

En la parte frontal se colocó el título de la tesis con sus autores y tutor, y adicionalmente está el controlador de temperatura para que pueda ser manipulado por el usuario. Figura#

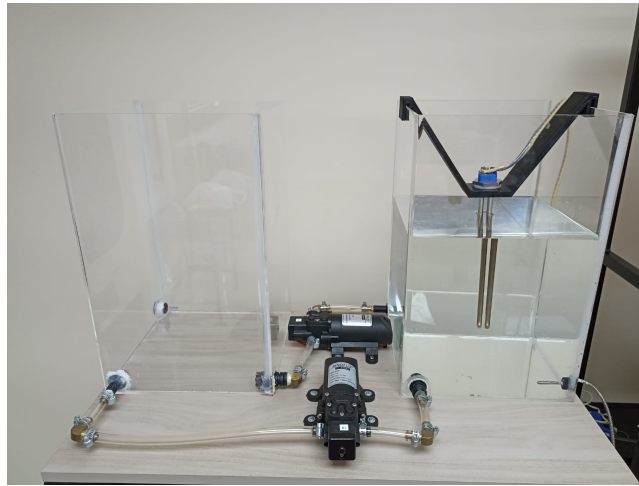


Figura 29. Resistencia con soporte en el tanque de temperatura.



Figura 30. Información principal de la tesis. Fuente: Los autores

La parte electrónica y eléctrica se ubicó en la parte inferior de la mesa, consta de una fuente de 24V para las bombas, un circuito electrónico para el control de las bombas mediante el PLC, un contactor para maniobrar la resistencia de calor y el controlador de temperatura.

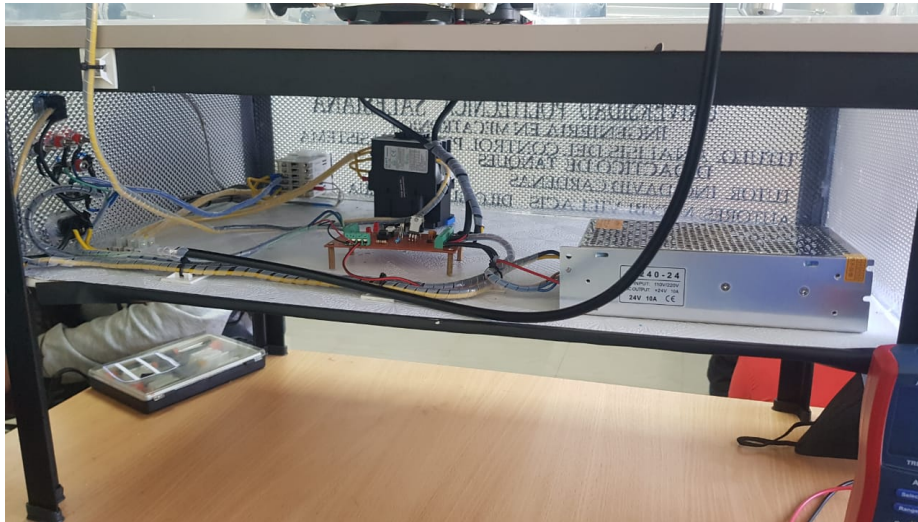


Figura 31. Electrónica y conexiones de fuerza para la temperatura y nivel. Fuente: Los autores

XI-C. Interfaz HMI

En Tia Portal se diseñó la interfaz HMI para el usuario, el cual contiene el setpoint para ser modificado, la lectura del sensor de presión, marcha y paro del proceso y graficas del sistema.

En la Figura 32, se muestra la interfaz de portada que tendrá el usuario.

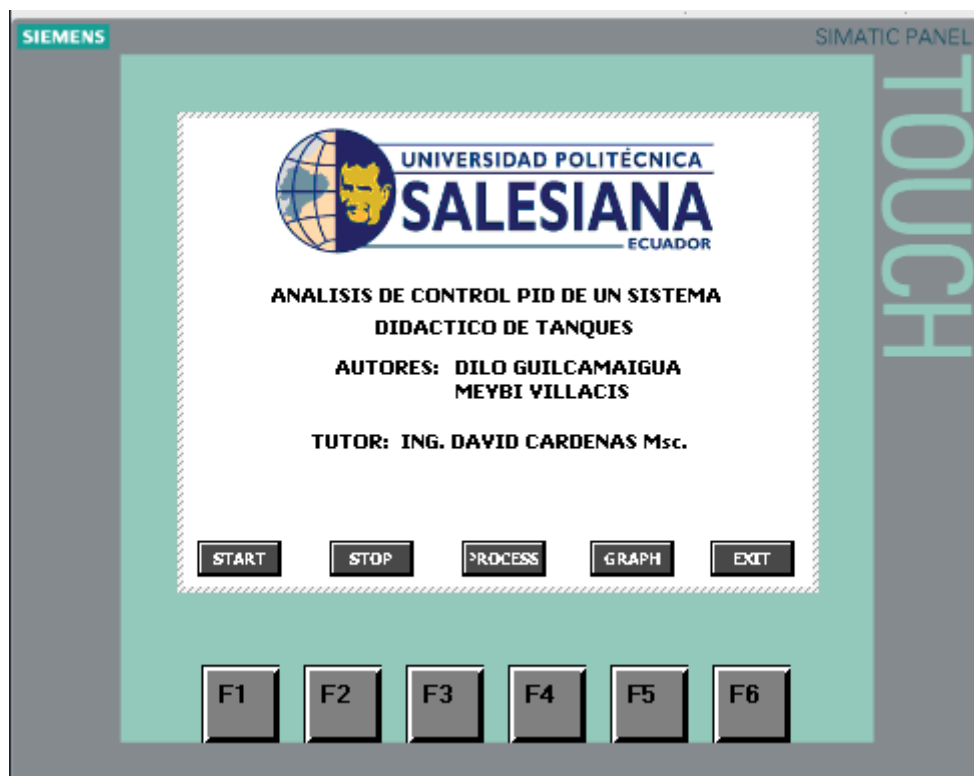


Figura 32. Diseño de la portada del HMI en Tiaportal. Fuente: Los autores

Para que el usuario pueda ver el proceso, se puede seleccionar el botón “PROCESS” en la portada. En la Figura

33, se muestra la pantalla del proceso como el set point, señal de sensor e indicador de marcha y paro. También se implementó la opción de cambio de los parámetros PID.



Figura 33. Diseño de la visualización del proceso en Tiaportal. Fuente: Los autores

Finalmente se diseñó una pantalla para visualizar la respuesta del sistema ante la salida PID, es decir la gráfica del setpoint, variable del proceso y acción PID. En la Figura, se muestra la interfaz descrita anteriormente.

En la Figura 35, se muestra la portada con el HMI KTP600, para dar acceso al proceso, grafica, marcha y paro del control PID.

En la Figura 36, se muestra la interface en la que forma parte del enfoque de este trabajo, ya que se pueden modificar los parámetros de control PID directamente desde el HMI. De tal manera el usuario puede asimilar los cambios que llegue a tener la dinámica de estabilización del nivel. Cumpliendo así uno de los objetivos propuestos. En la Figura 37, se puede observar la pantalla en la que el usuario puede ver la gráfica del comportamiento de la planta, así como su estabilización a lo largo del tiempo y la acción PID que aplicara el controlador.

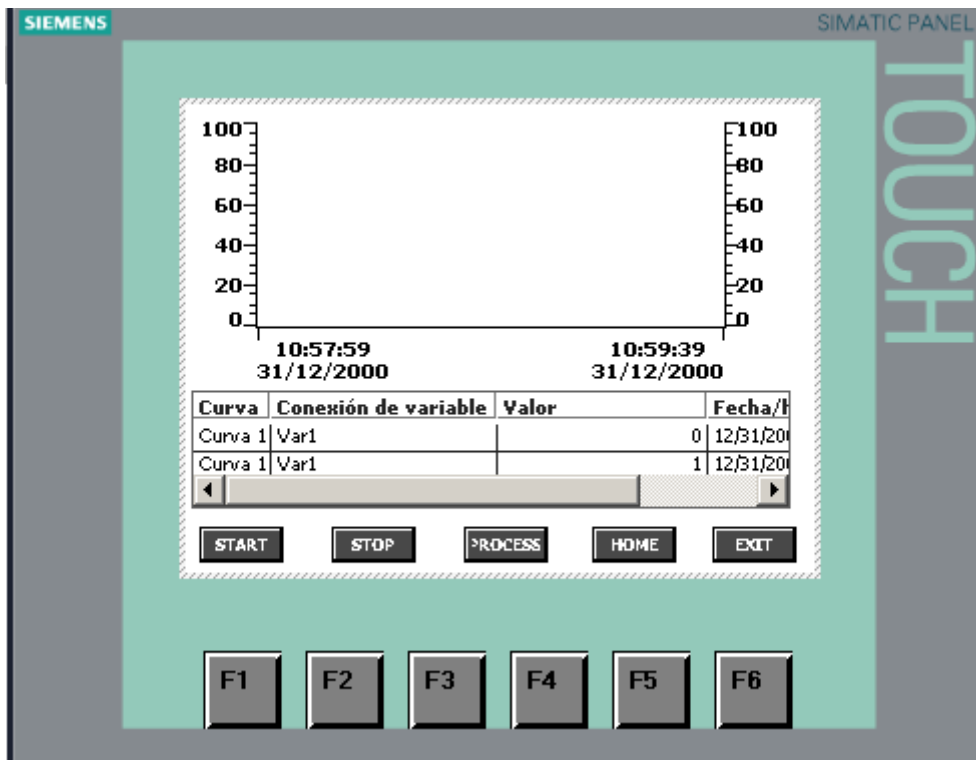


Figura 34. Diseño de la visualización de la grafica de respuesta en el tiempo del sistema en Tiaportal. Fuente: Los autores

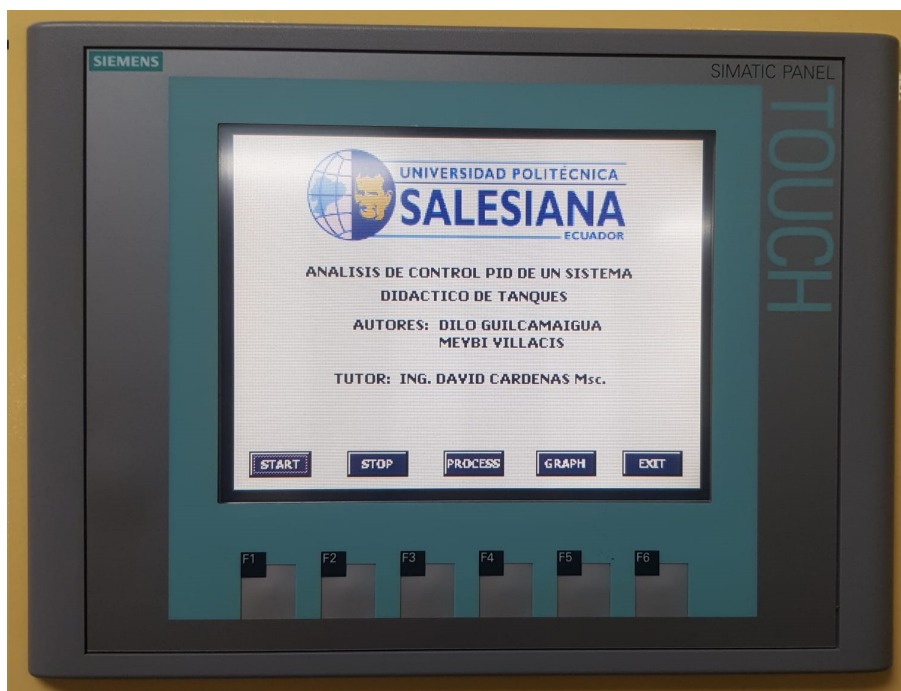


Figura 35. Portada en HMI KTP600. Fuente: Los autores



Figura 36. Interface de Proceso en HMI KTP600. Fuente: Los autores

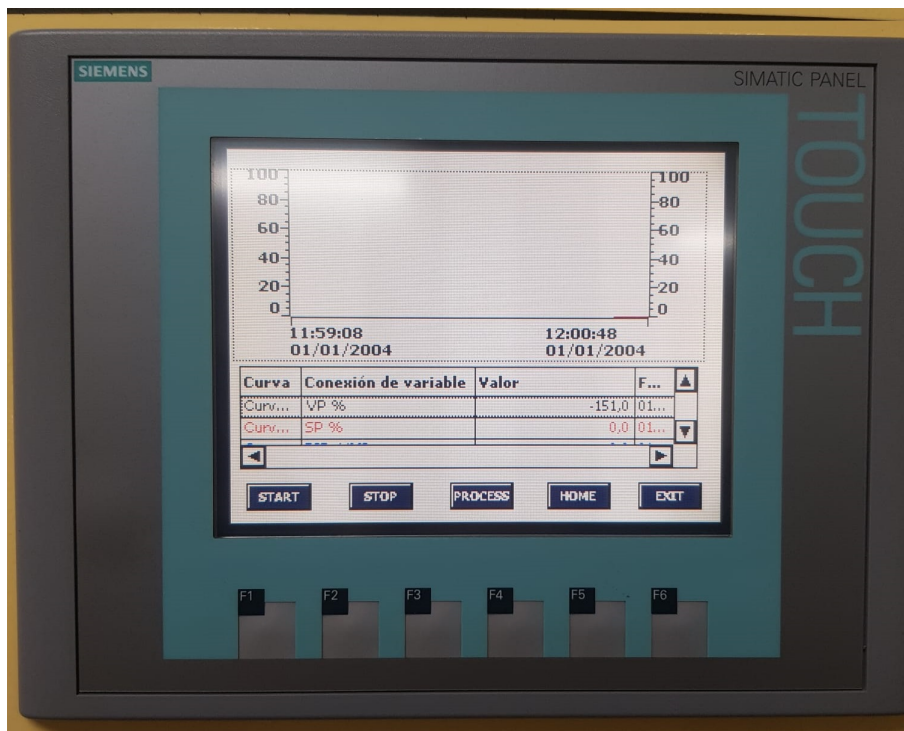


Figura 37. Interface de la grafica del proceso en HMI KTP600. Fuente: Los autores

XI-D. Pruebas de procesos reales

XI-D1. Llenado y vaciado de los tanques: Los tanques se pusieron a prueba con el proceso de llenado de líquido al nivel máximo de control, de esa manera el resultado que se observó fue que los tanques no presentaban fugas. En la Figura 38, se muestra el proceso descrito anteriormente.

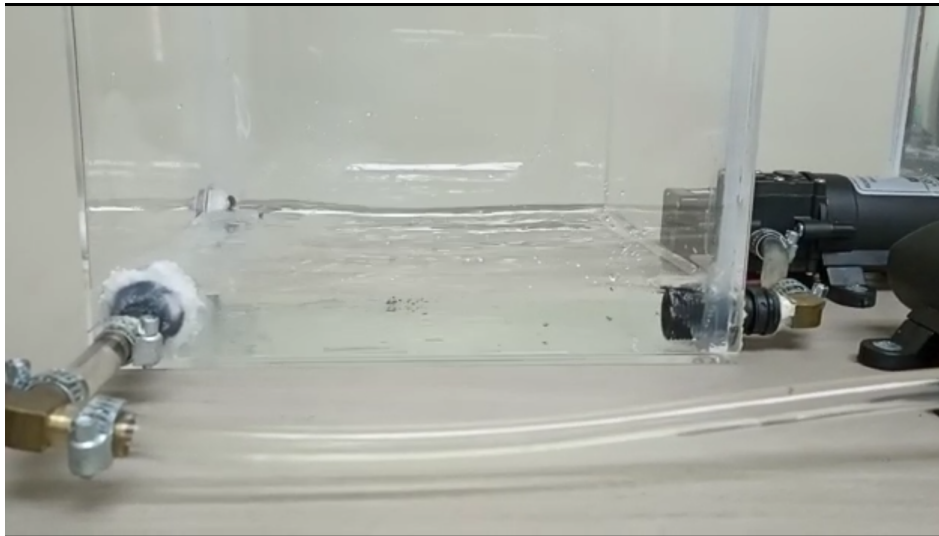


Figura 38. Llenado del tanque de control de nivel. Fuente: Los autores

En la Figura 39, se presenta el tanque de control y como resultado del proceso anterior el tanque no presenta fugas de agua.

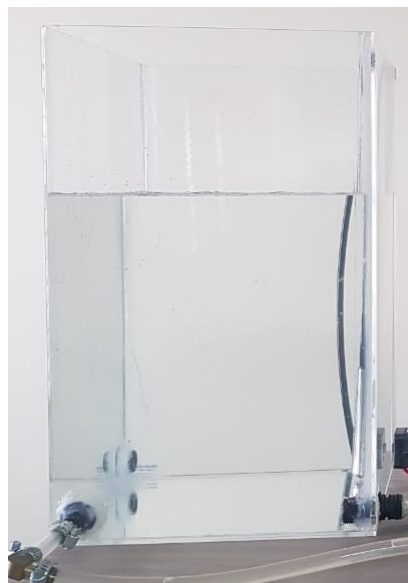


Figura 39. Tanque de control con el nivel máximo a controlar. Fuente: Los autores

De igual manera se verifico con anterioridad en el tanque de temperatura, y los resultados obtenidos indicaron que tampoco presentaba fugas. En la Figura 40, se puede observar lo descrito anteriormente.

Se uso programación en Tia Portal, para cumplir con este objetivo. En la Figura 41, se muestra los bloques de código Ladder en la cual se comanda las bombas por separado para poder realizar el llenado y vaciado de los tanques. La señal normalizada y escalada es emitida por las salidas análogas del PLC a las bombas.



Figura 40. Tanque de temperatura con el nivel máximo a controlar. Fuente: Los autores

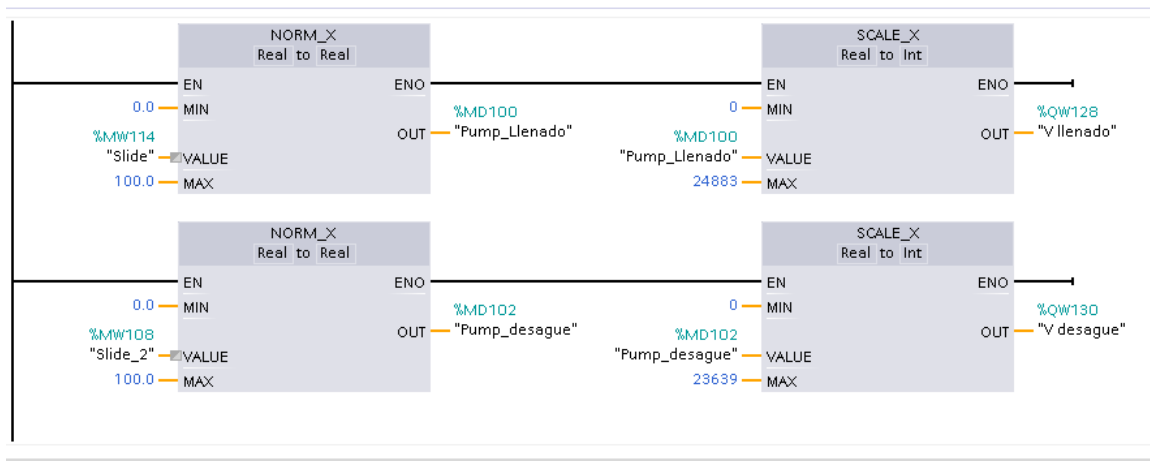


Figura 41. Programación para controlar el llenado y vaciado de los tanques . Fuente: Los autores

XI-D2. Agitación del líquido para la temperatura: La resistencia de calor tiene la característica de calentarse en la parte superior antes que en su punta. Por ese motivo para tener homogeneidad de temperatura en el líquido, se decidió realizar el proceso de agitación del líquido con las mismas bombas de la planta, con su funcionamiento al mismo tiempo. Sin lo anterior la temperatura se concentra en la parte superior del nivel y tardaba en llegar al nivel del sensor. En la Figura

Para este proceso se programó en Tia Portal el funcionamiento de las bombas simultáneamente. En la Figura 42, se observa los bloques de programación para el proceso de agitación.

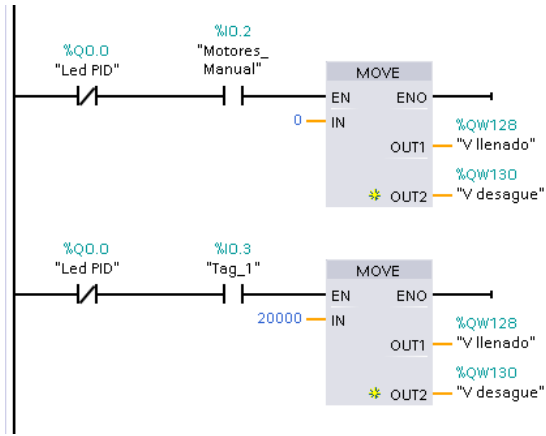


Figura 42. Programación para el proceso de agitación. Fuente: Los autores

XII. CRONOGRAMA

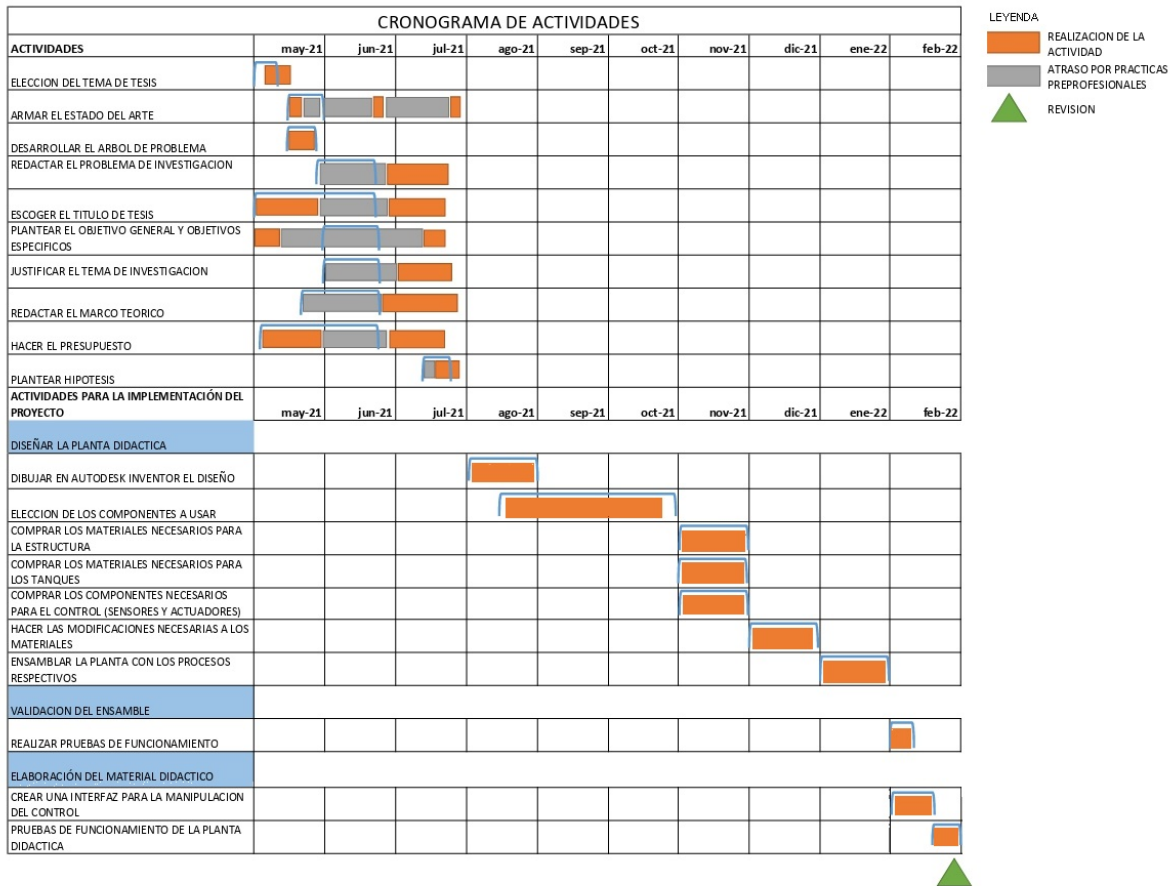


Figura 43. Cronograma de actividades. Fuente: Los autores

XIII. PRESUPUESTO

PRESUPUESTO PARA LA IMPLEMENTACION DEL PROYECTO			
DISEÑO DE LA PLANTA DIDACTICA			
MATERIALES PARA ESTRUCTURA	VALOR/UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
TANQUE DE ACRILICO	\$ 50,00	\$ 2,00	\$ 100,00
MAGUERA TRANSPARENTE	\$ 1,80	\$ 3,00	\$ 5,40
BASE DE MADERA	\$ 7,50	\$ 1,00	\$ 7,50
PLANCHA DIFUSORA DE LUZ	\$ 6,80	\$ 1,00	\$ 6,80
PERFIL EN L PARA LA ESTRUCTURA	\$ 10,00	\$ 2,00	\$ 20,00
REGATONES ANGULARES	\$ 1,00	\$ 6,00	\$ 6,00
ELECTRODOS (VARILLAS DE SOLDAR) Lb	\$ 1,80	\$ 1,00	\$ 1,80
TORNILLOS (FUNDA DE 12)	\$ 1,90	\$ 2,00	\$ 3,80
CODOS DE BRONCE PARA MANGUERA	\$ 3,00	\$ 4,00	\$ 12,00
UNIONES DE BRONCE PARA MANGUERA	\$ 2,00	\$ 4,00	\$ 8,00
TEFLON	\$ 0,35	\$ 3,00	\$ 1,05
SILICON INDUSTRIAL TRANSPARENTE	\$ 2,98	\$ 2,00	\$ 5,96
BRUJITA	\$ 0,35	\$ 6,00	\$ 2,10
BICARBONATO	\$ 1,00	\$ 2,00	\$ 2,00
PLANCHA DE YESO	\$ 4,50	\$ 1,00	\$ 4,50
CINTA AISLANTE NEGRA	\$ 1,34	\$ 2,00	\$ 2,68
AEROSOL NEGRO MATE	\$ 4,29	\$ 1,00	\$ 4,29
ABRAZADERA REGULABLE	\$ 0,50	\$ 14,00	\$ 7,00
EQUIPOS IMPLEMENTADOS	VALOR/UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
TERMOCUPLA BAYONETA TIPO J, 2MT			
EBC	\$ 14,21	\$ 1,00	\$ 14,21
RESISTENCIA DE CALOR (6000W-240V ; 1500W-120V)	\$ 50,40	\$ 1,00	\$ 50,40
CONTACTOR NC1-3210 32 AMP CHINT			
1NO	\$ 25,98	\$ 1,00	\$ 25,98
CONTROLADOR DE TEMPERATURA (TCN4S-24R D/P			
48X48MM SAL RELE+SSR)	\$ 60,48	\$ 1,00	\$ 60,48
SENSOR DE NIVEL (12-32 V CC, 4-20 Ma)	\$ 63,73	\$ 1,00	\$ 63,73
BOMBAS DE AGUA	\$ 60,00	\$ 2,00	\$ 120,00
FUENTE DE 24V 7A	\$ 35,00	\$ 1,00	\$ 35,00
IMPLEMENTOS ELECTRONICOS Y ELECTRICOS	VALOR/UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
BAQUELA TIPO GALLETAS 10X10 CM	\$ 0,50	\$ 3,00	\$ 1,50
TARJETA ELECTRONICA	\$ 7,00	\$ 10,00	\$ 70,00
DISPOSITIVOS ELECTRONICOS PARA TARJETA	\$ 3,00	\$ 5,00	\$ 15,00
CABLE 14 AWG	\$ 0,68	\$ 5,00	\$ 3,40
BORNERAS	\$ 0,15	\$ 10,00	\$ 1,50
CONECTOR HEMBRA 3 SALIDAS	\$ 0,50	\$ 1,00	\$ 0,50
SWITCH	\$ 0,75	\$ 1,00	\$ 0,75
OTROS RECURSOS	VALOR/UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
PAQUETE DE ABRAZADERAS	\$ 1,50	\$ 1,00	\$ 1,50
ESPIRAL PARA CABLE	\$ 2,35	\$ 1,00	\$ 2,35
PISTOLA PARA SILICON	\$ 5,65	\$ 1,00	\$ 5,65
TOTAL			\$ 672,83

Figura 44. Presupuesto del proyecto. Fuente: Los autores

XIV. CONCLUSIONES

Las pruebas, análisis y procesos que se realizaron durante la ejecución de este trabajo, dan un conjunto de experiencia y reflexión enfocado en el funcionamiento de la planta.

La optimización fina del Bloque PID_Compact dan valores precisos de parámetros PID, sin embargo, aún se puede dar un enfoque más aproximado a la exactitud. Para lograrlo el parámetro derivativo, se le da un valor de nulo. Se concluye que por tratarse de un parámetro que actúa con la derivada del error, el ruido del sensor de nivel proporciona una corrección innecesaria para el actuador. El ruido del sensor es aproximado a la consigna deseada, por lo que dejar sin efecto a la parte derivativa del controlador tiene sentido.

Los materiales presentes en la tesis forman parte de la planta didáctica y son la base para el objetivo del entregable final. Tanto como el perfil angular metálico de 3cm x 3cm, los tanques de acrílico transparente, madera de espesor 1,5cm entre otros, son funcionales y permitieron la construcción de la planta didáctica.

Se concluye que, la planta didáctica después de su construcción, tiene materiales que permiten con gran comodidad ver los procesos de nivel y temperatura.

La planta didáctica tuvo que someterse a pruebas para comprobar que esté en un correcto funcionamiento. Con el proceso de llenado se comprobó que los tanques están en buen estado y no presentan fugas. De igual forma la circulación de agua en el proceso de calentamiento, dio como resultado la homogeneidad de temperatura en el líquido.

Con lo anterior se puede concluir que las pruebas de procesos reales (Llenado de nivel, y agitación), permiten comprobar la efectividad de la planta.

El HMI implementado permite modificar directamente los parámetros PID, teniendo en cuenta que al ingresarlos la dinámica de la planta cambiará respecto a su estabilidad, se puede concluir que el usuario tendrá una noción clara del control PID.

XV. RECOMENDACIONES

Se recomienda el mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, en el sistema electrónico para las bombas, ya que, por un lapso considerable de uso los componentes pueden llegar a dañarse, ya sea por temperaturas elevadas en los transistores, integrados, etcétera.

Se recomienda también que el funcionamiento de las bombas se las evite hacer sin el líquido en los tanques, ya que estas están fabricadas para su funcionamiento nominal con líquido.

Los tanques se pueden llenar de moho, se recomienda sacar el agua cuando ya no se use la planta.

El proceso de agitador de agua debe realizarse al menos tres veces mientras la resistencia está encendida para conseguir el setpoint establecido.

REFERENCIAS

- [1] J. Arias, M. Á. Villasís y M. G. Miranda, «El protocolo de investigación III: la población de estudio,» *Alergia México*, vol. 63, n.º 2, págs. 201-206, 2016.
- [2] Á. Azuero Azuero, «Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación,» 2018.
- [3] M. Bernal, J. Aponte, J. Carrillo y Universidad Militar Nueva Granada, «Sistemas de control para mesas vibratorias,» *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 33, n.º 2, págs. 331-355, 2015.
- [4] BIELCO AUTOMATISMO, «Resistencias de inmersión,» inf. téc., pág. 1.
- [5] CFR A CORUÑA, *CURSO DE DISEÑO 3D AUTODESK INVENTOR*, pág. 382.
- [6] CHNT, «CONTACTORES INDUSTRIALES,» inf. téc., pág. 155.
- [7] M. cr.com, *Termocupla J de Bayoneta*.
- [8] DECTRONIC, *Controlador de temperatura - Serie TK - Autonics*.
- [9] INSTRUMATIC, *Termocupla Tipo J Con Racor Para Bayoneta*.
- [10] JMIndustrial, *Controladores de temperatura*.
- [11] —, *Resistencias Calefactoras*.
- [12] I. I. Lázaro, *INGENIERÍA DE SISTEMAS DE CONTROL CONTINUO*. 2015, pág. 44.
- [13] D. G. Mogrovejo, «DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE CUATRO TANQUES INTERCONECTADOS CON CONTROL PID ROBUSTO MULTIVARIABLE,» Tesis doct., 2017, pág. 80.
- [14] R. Morales y R. A. Ramírez, *SISTEMAS DE CONTROL MODERNO. VOLUMEN I: SISTEMAS DE TIEMPO CONTINUO*. 2013, pág. 29.
- [15] Obra Colectiva Edebé, «Automatismos y robots,» en *TECNOLOGÍA 4 ESO*, 2012, págs. 178-205.
- [16] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. 2010.
- [17] OMEGA, *Controladores de temperatura*.
- [18] M. A. Perez, A. Hidalgo, E. Berenguer y Universidad Nacional de San Juan, «INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO,» Tesis doct., 2007, pág. 69.
- [19] S. Pérez y C. Renedo, «Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas,» inf. téc., pág. 68.
- [20] B. Romero y V. Nino, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y CONTROL ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON LAS VARIABLES NIVEL Y CAUDAL EVALUADOS SOBRE UN MÓDULO DIDÁCTICO,» Tesis doct., 2016, pág. 103.
- [21] D. Saa, «Análisis de la industria 4.0 en Latinoamérica y países desarrollados,» 2021.
- [22] SIEMENS, «Controlador programable S7-1200,» 2018, págs. 27-27.
- [23] Siemens, «S7-1200, S7-1500 Regulación PID,» inf. téc., 2014, pág. 522.
- [24] Singflo, «FLO Small Water Pressure Pump,» inf. téc.
- [25] Taizhou Allison Instrument, «Sensor de presión hidrostática,» inf. téc.
- [26] R. Vásquez y A. War, *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN (Manual del estudiante)*. 2020, pág. 139.

XVI. ANEXOS

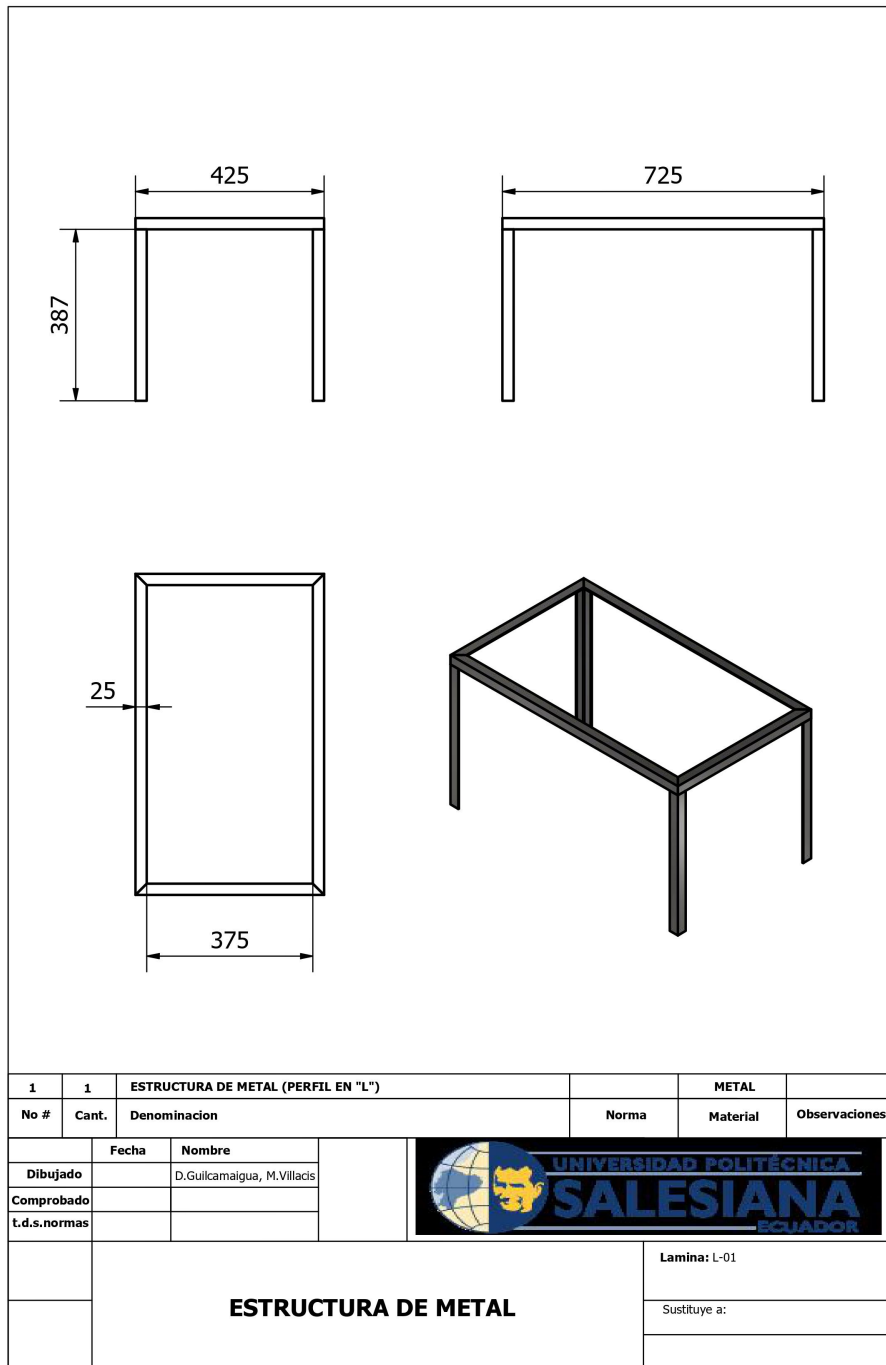


Figura 45. Plano de la estructura de perfil metálico. Fuente: Los autores

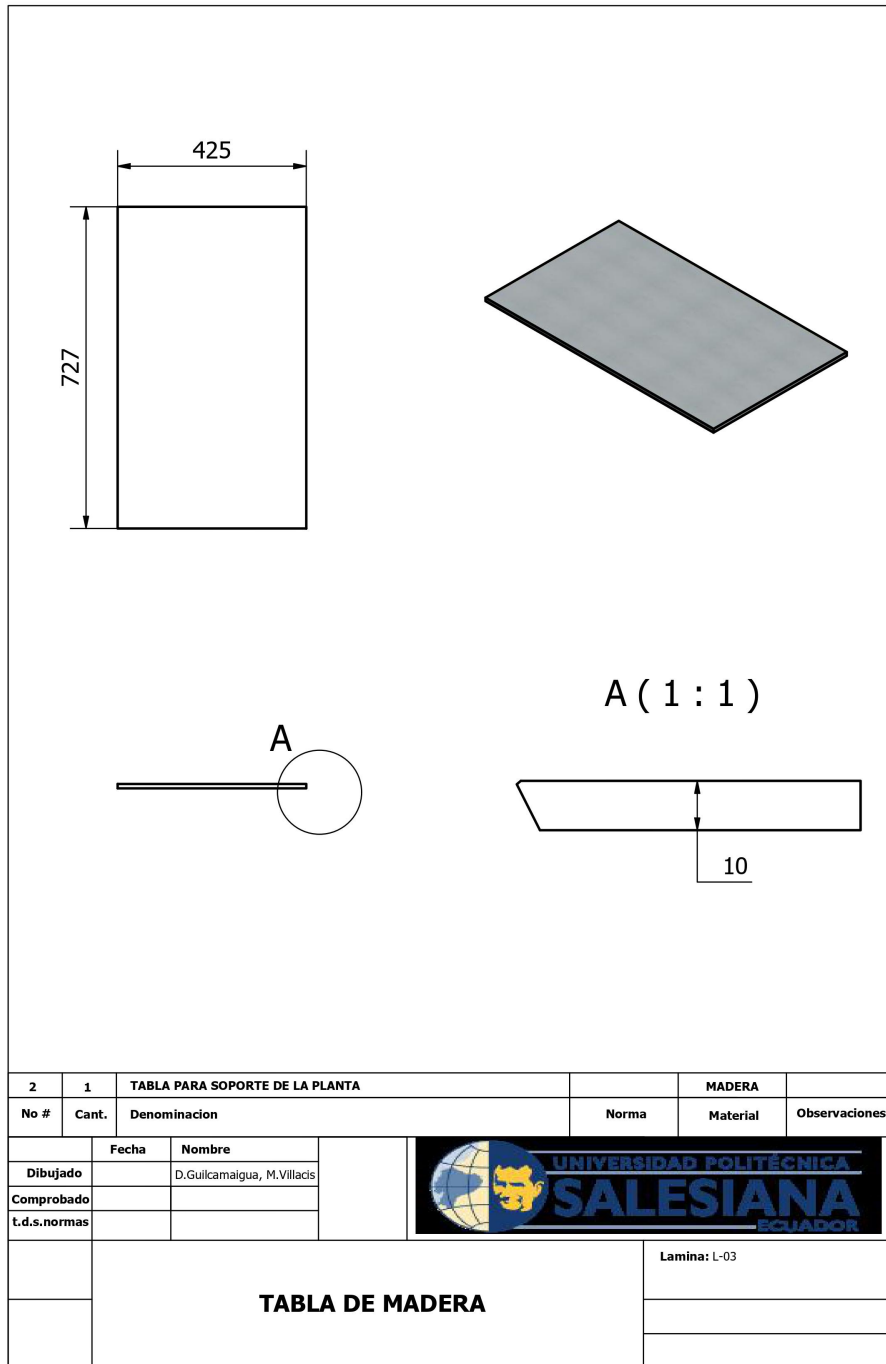


Figura 46. Plano de la tabla de soporte de la planta. Fuente: Los autores

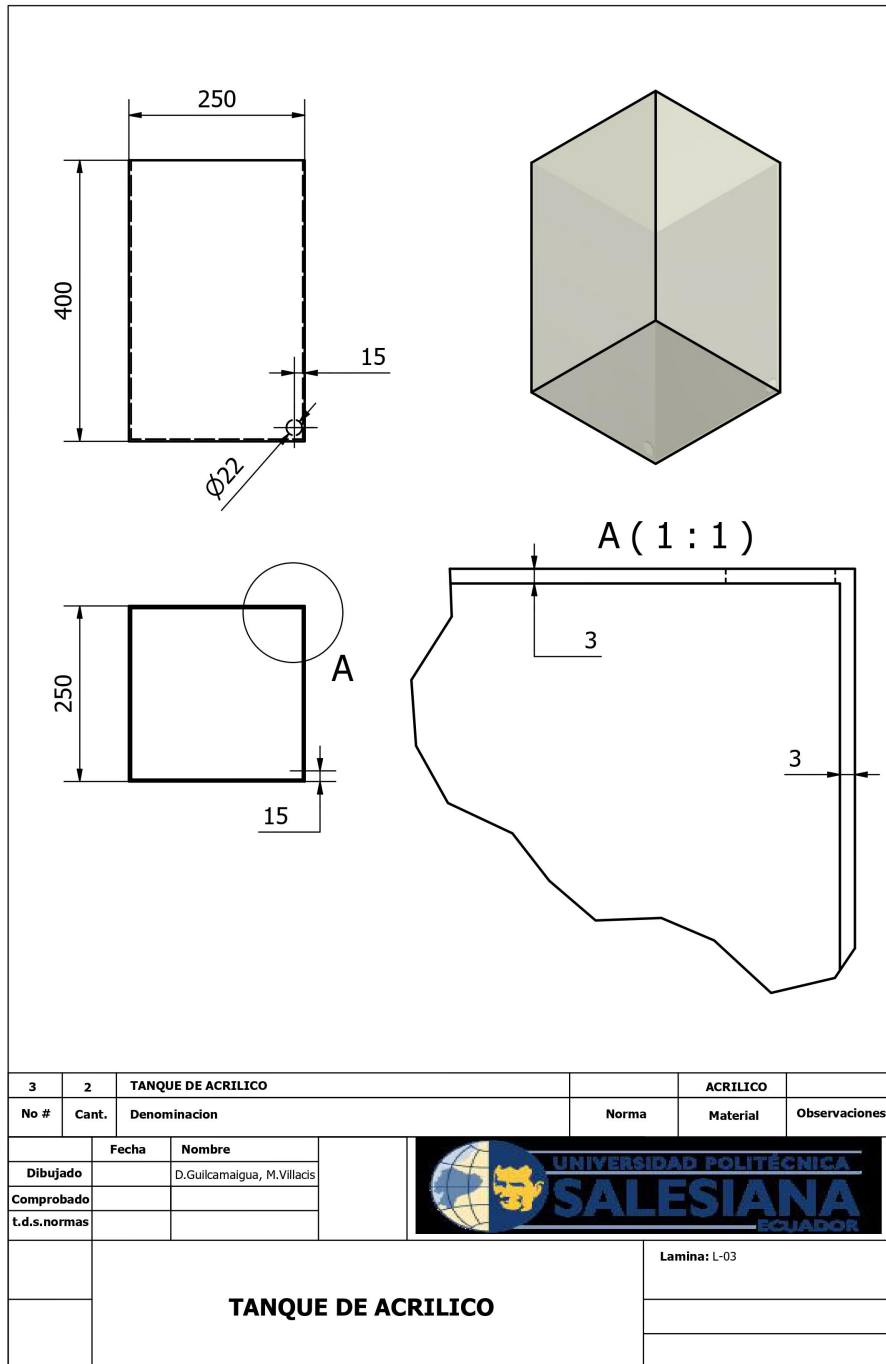


Figura 47. Plano del tanque. Fuente: Los autores

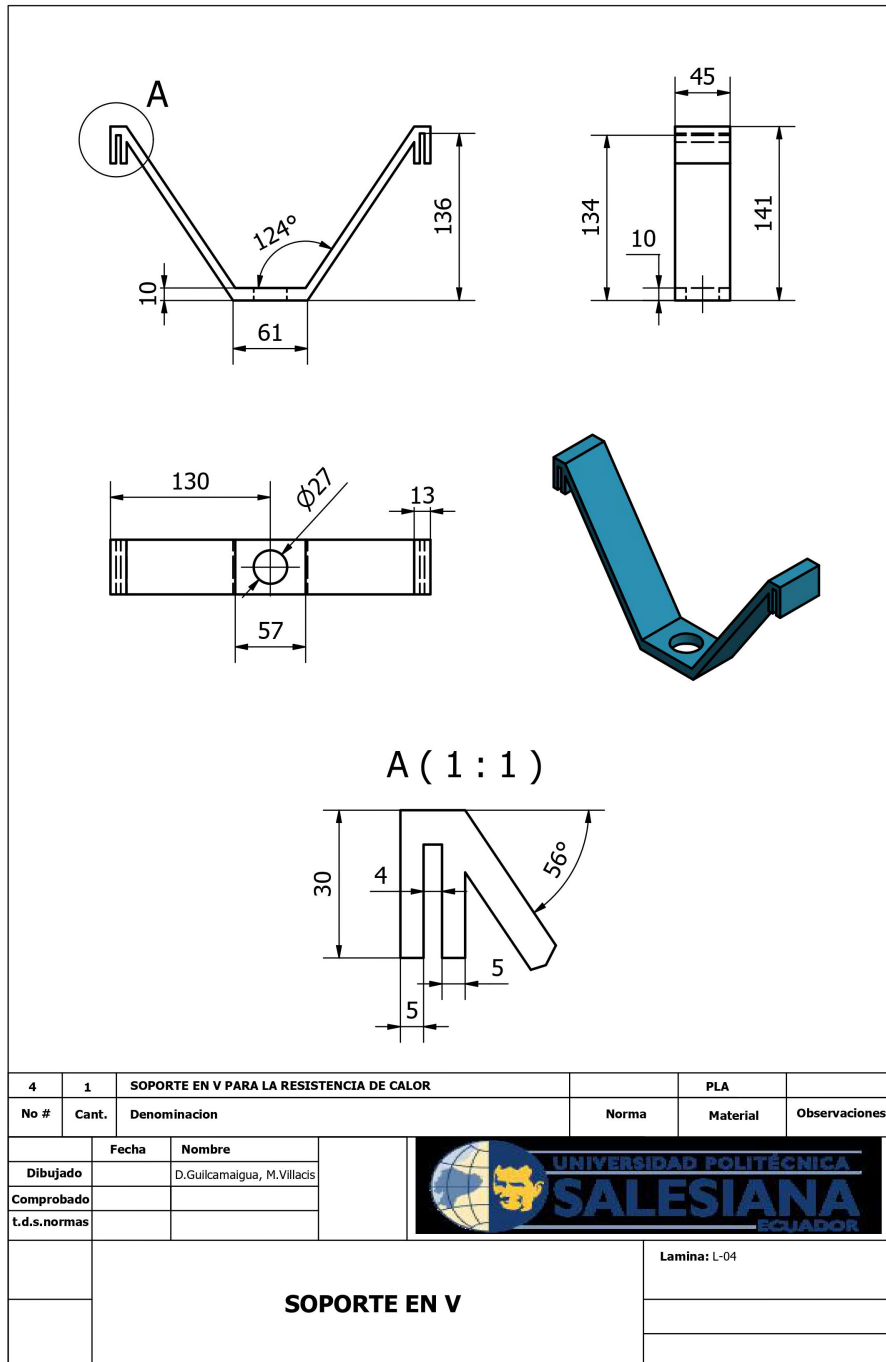


Figura 48. Plano del soporte para la resistencia de calor. Fuente: Los autores

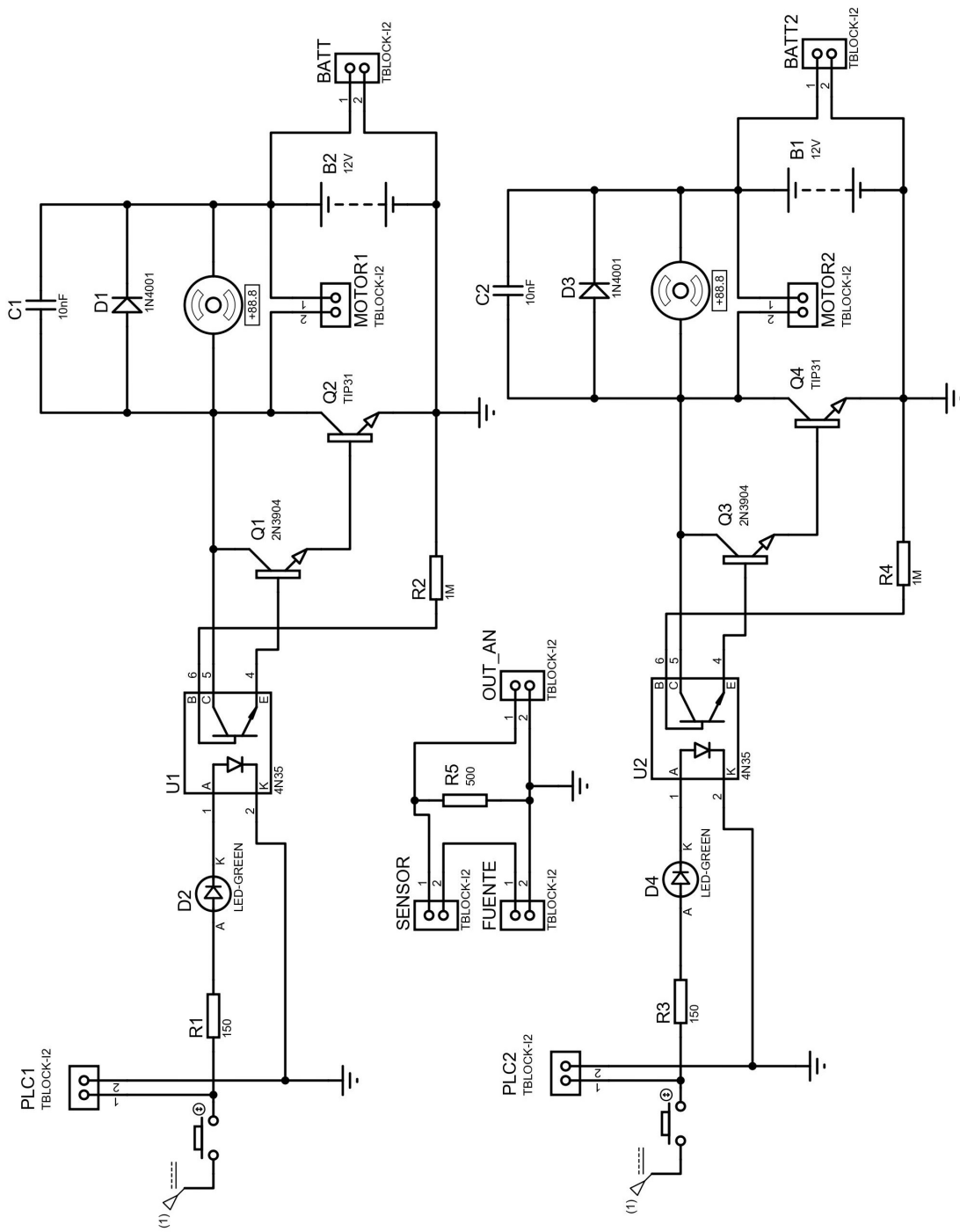


Figura 49. Circuito para el control de las bombas. Fuente: Los autores