



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL
PARA AUTOMATIZAR LA MANIPULACIÓN DE LAS VARIABLES DE
PROCESO EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO”**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTOR

CÉSAR IVÁN BELUPÚ AMAYA

ASESOR

ING. GUILLERMO MORALES ÁLAMO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

GESTIÓN EMPRESARIAL Y PRODUCTIVA

PIURA – PERÚ

2017

PÁGINA DEL JURADO

**DR. CARLOS ENRIQUE ARELLANO RAMIREZ
PRESIDENTE**

**MSc. FERNANDO MADRID GUEVARA
SECRETARIO**

**DRA. SHLOMI NEREIDA CALDERÓN VALDEZ
VOCAL**

DEDICATORIA

A Dios por ser mi fortaleza y permitirme haber llegado hasta aquí.

A mis queridos padres por su confianza y amor, por los sacrificios que hicieron este tiempo para brindarme su incondicional apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Guillermo Morales Álamo quién mostró mucho interés, por su gran apoyo en la asesoría de la presente investigación.

A la Universidad César Vallejo, filial Piura, en especial a la facultad de Ingeniería Industrial por la oportunidad que me dieron para seguir creciendo profesionalmente.

También a mis compañeros de clase, compañeros de trabajo por brindarme su apoyo y soporte para poder concluir de manera satisfactoria esta investigación.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, César Iván Belupú Amaya con DNI N° 43757915, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería Industrial, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y auténtica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada por la cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Piura, Febrero del 2017

PRESENTACIÓN

Señores miembros de jurado, presento ante ustedes la tesis titulada “Implementación de un Sistema de Monitoreo y Control para automatizar la Manipulación de las Variables de Proceso en tanques de Almacenamiento”. Esta tesis ha sido desarrollada con el objetivo de automatizar la manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento mediante la implementación de un sistema de monitoreo y control. Este trabajo cuenta de 7 capítulos. En el capítulo 1 se explican los conceptos teóricos, trabajos previos y estado del arte en cuanto a instrumentación industrial para tanques de almacenamiento, estrategias de control para mantener los niveles de estabilidad y sobre desarrollo de interfaces gráficos para monitorear los resultados. En el capítulo 2 se explica el diseño de la investigación junto con el marco metodológico mostrando que es una investigación aplicada pre experimental. En el capítulo 3 se explican los resultados de la investigación. En el capítulo 4 se hace una discusión de resultados comparando los de esta investigación con los trabajos previos antes mencionados. En el capítulo 5 se muestran las conclusiones. En el capítulo 6 se muestran las recomendaciones para interactuar con el sistema desarrollado de la mejor manera. Finalmente el capítulo 7 son las referencias usadas en la presente investigación.

Esta tesis se presenta en cumplimiento del reglamento de grados y títulos de la Universidad César Vallejo para obtener el título profesional de Ingeniero Industrial.

Esperando cumplir con los requisitos de aprobación.

EL AUTOR

ÍNDICE

CARÁTULA	1
Página del jurado.....	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Declaración de autenticidad.....	5
Presentación.....	6
Índice.....	6
Resumen	8
Abstract	9
I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad Problemática	10
1.2. Trabajos previos.....	10
1.3. Teorías relacionadas al tema	13
1.4. Formulación del problema.....	24
1.5. Justificación del estudio	24
1.6. Hipótesis	25
1.7. Objetivos	25
II. MÉTODO	27
2.1. Diseño de investigación	27
2.2. Variables y operacionalización	27
2.3. Población y muestra.....	29
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	29
2.5. Métodos de análisis de datos	29
2.6. Aspectos Éticos.....	29
III. RESULTADOS	30
IV. DISCUSIÓN	39
V. CONCLUSIONES	41
VI. RECOMENDACIONES	43
VII. REFERENCIAS	44
ANEXOS	47

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo automatizar la manipulación de variables de proceso en tanques de almacenamiento mediante un sistema de monitoreo y control, para esto se hicieron pruebas experimentales con un módulo Industrial que es el WorkStation de Festo. El equipo consta de 2 tanques, con una bomba que permite además de la descarga del agua, la recirculación con el fin de mantener el líquido agitado y la temperatura homogénea. Tiene sensores de flujo para medir el flujo de agua a la entrada y a la salida, también sensores de nivel y de temperatura. Los procesos a controlar son: Nivel, Flujo y Temperatura del agua; también se ha estudiado diferentes estrategias de control para asegurar la estabilidad de estos sistemas, demostrando que son estables a través de los criterios de Bode y Nyquist. El control automático es realizado por una aplicación desarrollada en el software Labview, en un computador que corre bajo el sistema operativo Windows 7. Este software Labview permite la comunicación entre la instrumentación y el PLC que es el encargado de leer las señales del proceso.

Finalmente, se modela un lazo de control de nivel, flujo y temperatura realizando pruebas específicas, obteniéndose resultados congruentes.

Se concluye que la instrumentación industrial para el correcto funcionamiento de los procesos a monitorear y controlar en el módulo de tanques de almacenamiento son los sensores ultrasónicos, capacitivos, sensor de flujo y sensor de temperatura PT100. Con respecto a las estrategias de control se concluye que el control PI es el más adecuado al momento de realizar control de flujo y temperatura y el PID para el control de nivel.

Con respecto al sistema de monitoreo y control, se construyó gráficamente de una manera muy sencilla, se usó la interface Control PID en la cual el usuario puede probar los controles en tiempo real, y además fueron probados usando la interfaz del Labview en la cual el usuario puede obtener la respuesta de la planta.

Palabras Claves: Control, Estabilidad, SCADA, Monitoreo, Variables de Proceso.

ABSTRACT

This research aims to automate the handling of process variables in storage tanks by a monitoring and control system for this experimental tests were made with an industrial module is WorkStation Festo.

The equipment comprises two tanks, with a pump that besides allows discharge of water recirculation in order to keep the stirred liquid and homogeneous temperature. It has flow sensors for measuring the flow of water at the entrance and exit, also level sensors and temperature.

Control processes are: Level, Flow and water temperature; It has also been studied different control strategies to ensure stability of these systems, showing that are stable over the Nyquist criteria and Bode.

Automatic control is performed by an application developed in Labview software on a computer running under the Windows 7 operating system Labview This software enables communication between instrumentation and PLC it is in charge of reading the signs of the process.

Finally, a control loop level, flow and temperature conducting specific tests, obtaining consistent results is modeled.

It is concluded that industrial instrumentation for the proper functioning of processes to monitor and control module storage tanks are ultrasonic sensors, capacitive, flow and temperature sensor PT100 sensor.

Regarding control strategies it is concluded that the PI control is best suited at the time of flow and temperature control and PID control level.

With regard to monitoring and control, built graphically in a very simple way, the interface PID Control in which the user can test the real-time controls used, and were also tested using the interface Labview in which the user can get the answer of the plant.

Keywords: Control, Stability, SCADA, Monitoring, Process Variables.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

En el control automático de procesos, la manipulación de variables es importante para optimizar recursos, para las industrias es importante mantener en un rango de operación adecuado el proceso que se está controlando sino es así se incurre en gastos grandes innecesarios que le quitan rentabilidad a una industria.

Vale decir que en la industria mundial la mayor parte de procesos importantes tienen que ver con tanques de almacenamiento como son los usados para almacenar líquidos en la industria de gases, del petróleo, los usados en refinerías por sus requerimientos para el proceso de almacenamiento, etc.

En la Universidad de Piura se tiene un módulo hardware experimental para el aprendizaje del control automático en diferentes procesos para tanques de almacenamiento ya sea control de nivel, de flujo o de temperatura.

Este módulo no cuenta con un sistema para automatizar la manipulación de estas variables, no se conoce cuál es la instrumentación más adecuada para medir variables en tanques de almacenamiento, ni que estrategias de control se deben implementar para mantener las variables de proceso en un rango adecuado de operación, tampoco se tiene un sistema con interfaz gráfica para el monitoreo y control en tiempo real de las variables de proceso, esto impide conocer de forma real el funcionamiento integrado de esta planta real educativa.

1.2. Trabajos previos

1.2.1. Internacionales

(Estrella, 2007) titula su tesis “Diseño e Implementación del Sistema para el Control y Supervisión de Tanques de Almacenamiento de Aceite Palmiste”. El objetivo principal de esta tesis fue el diseño del hardware y software del sistema de control para el proceso en tanques de almacenamiento. Esta tesis concluye

que las aplicaciones de este sistema en el sector industrial es muy diversa, pudiendo controlarse otros tipos de procesos productivos tales como, nivel de agua, temperatura de silos de leche, temperatura de fluidos en tuberías, temperatura de cámaras frías etc, además muestra que la Instrumentación virtual es un intérprete visual de las condiciones del proceso, es una herramienta muy importante para centralizar el control industrial. También concluye que los sensores de nivel miden con un margen de error aceptable, por lo tanto es idóneo para aceites comestibles y otros líquidos. Sin embargo también concluyen que el sensor de temperatura usado es inestable, debido al ruido eléctrico y sensibilidad de los componentes electrónicos que conforman la tarjeta.

(Quintero et al., 2009) titula su tesis “Software orientado a sistemas de control HMI/Scada usando recursos libres y de código abierto, desarrollado sobre plataforma Linux”. El objetivo principal de este trabajo es generar una alternativa libre y de código abierto, a las aplicaciones de desarrollo de sistemas HMI/Scada, cuya licencia de ejecución tiene un costo elevado, y a las cuales no se puede modificar para adaptarlas a un sistema en particular. Esta tesis concluye con un sistema de monitoreo y control llamado “CM” que fue diseñado y estructurado para que pueda ejecutar algoritmos de control en tiempo real, este software es capaz de control un proceso industrial de varias variables y visualizar en tiempo real datos, gráficos tendencias e históricos de las variables de la planta.

(Oliveira et al., 2002) titula su artículo científico “Instrumentation and process control”. El objetivo principal de este artículo es mostrar que metodologías se usan en control y medición para la operación con procesos industriales. También muestra cómo integrar el hardware con las estrategias de control implementadas. Este artículo concluye que el diseño del sistema de control puede tomar varias formas dependiendo en gran medida de la operación del proceso, también concluye que es mejor empezar por estructuras de control clásicos como son el control PI y PID.

(Richmond et al., 2009) titula su tesis “Diseño y construcción de una interfaz de

control de nivel, temperatura y flujo de agua en un tanque para uso en prácticas de laboratorio”. El objetivo principal de esta tesis es diseñar y construir una interfaz de control para utilizar en prácticas, que complementen la temática desarrollada en el curso “Control e Instrumentación de procesos” impartido por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. Esta tesis concluye que para la medición de nivel se ha seleccionado un sensor de presión manométrica económico debido no solo al costo sino también al ámbito bajo de medición y para la medición de temperatura queda restringida al intervalo de 5 a 50 °C, limitada por el ámbito de trabajo de los medidores de flujo. En este trabajo han construido un sensor de temperatura basado en un transistor.

1.2.2. Nacionales

(Campos, 2011) titula su tesis “Diseño e implementación de una interfaz para el control de un módulo educativo utilizando una PC para un laboratorio remoto-virtual de comunicaciones.” El objetivo principal de esta tesis es implementar un sistema de monitoreo para un módulo educativo exclusivamente construido para un laboratorio remoto. Esta tesis concluye que el conocer el funcionamiento de un proceso en una práctica experimental, conlleva en diversas ocasiones que aprender sobre estos temas sea más efectivo en cuanto a retención y comprensión porque la teoría se puede ver o relacionar en un experimento.

(Martínez, 2011), titula su tesis “Diseño del subsistema mecánico-eléctrico para un sistema de control de temperatura de un tanque”. El objetivo principal de esta tesis es desarrollar estrategias de control convencionales para el proceso de medición de temperatura de un tanque. Esta tesis concluye que el control de temperatura es especialmente lento debido a sus características técnicas y científicas, los sensores dispuestos en la planta se proveen de señales eléctricas a una interfaz conectada a un controlador, este a su vez, se encarga de procesar los datos y enviará señales hacia los actuadores instalados también en la planta. Su practicidad se basa en contar con un diseño el cual permita su

conexión con controladores PC's, a su vez concluye que la reducción de costos en el desarrollo e implementación está basado en aplicar criterios de selección adecuados sobre los elementos que componen el sistema.

1.2.3. Locales

(Ipanaqué et. al., 2012) titula su artículo “Desarrollo de Software SCADA para Supervisar y Monitorear Procesos Industriales”. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema con lenguajes de programación open source que quedará abierto para monitorear cualquier proceso industrial usado en pequeñas y medianas empresas. Este trabajo concluye que es posible realizar el control de un proceso a través de un software ayudándose de la comunicación entre sensores y tarjetas de adquisición de datos. En este trabajo en específico se desarrollaron tarjetas de adquisición de datos a medida porque se buscaba la implementación a bajo costo.

1.3. Teorías relacionadas al tema

1.3.1. Instrumentación Industrial en tanques de almacenamiento

Un proceso industrial se encarga de transformar, semi procesar, procesar las materias primas que sirven de entrada a un proceso industrial y lo convierte en productos terminados o semiterminados, este producto final es la salida del mismo proceso. Para lograr este objetivo una planta industrial necesita un conjunto de equipos, máquinas, controladores que interactúen entre sí.

Los instrumentos son los encargados de indicar los valores de las variables de proceso y después enviar la información al sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) o a la sala de control.

Otro punto importante en la instrumentación industrial son los elementos de control, que se encargan de la regulación y control de las variables que se están monitoreando en el proceso industrial. El estudio mediante módulos es primordial, ya que permite aplicar diversas técnicas de control, adquirir

experiencia, desarrollar diferentes líneas de trabajo y profundizar experimentalmente en el tema de automatización.

Los procesos a controlar son:

- a) Control de nivel.
- b) Control de flujo.
- c) Control de Temperatura.

1.3.2. Sensores y transductores

El transductor o elemento primario, es el instrumento que se utiliza para medir la variable deseada y como resultado entregar una señal de salida proporcional a ésta; es llamado elemento primario debido a que la medición es la acción inicial requerida para controlar un proceso o sistema (Mott, 1996). Un sensor, es la parte del transductor que reacciona de alguna forma sensitiva a una propiedad física relacionada con la variable que se desea medir y cuya respuesta se utiliza como la entrada al resto del sistema (Polke, 1994). En la mayoría de los casos se necesita la conversión de la cantidad física que se desea medir en una variable eléctrica, ya sea resistencia, capacitancia, inductancia, voltaje o corriente, que puede medirse con mucha mayor precisión (Hunter, 1978; Johnson, 1984). El transductor, por lo tanto, es el conjunto formado por un sensor y un transmisor que acondiciona la señal a alguna forma más adecuada para el sistema de control (Smith y Corripio, 1997).

Es importante aclarar que, por su mismo entorno, el sensor todavía es un dispositivo imperfecto en cuanto a exactitud. Porque al ser diseñado para ser sensible al parámetro que se desea medir, es muy difícil reducirle la sensibilidad al ambiente en el que este dispositivo debe trabajar. Es así que no se puede evitar que ciertos parámetros externos al ambiente actúen en el sensor e introduzcan un error en la medición. Para la selección de un sensor de un determinado proceso se requiere considerar la naturaleza de la medición (entrada) y la naturaleza de la salida. Las razones para seleccionar un equipo de otro varían en diversos parámetros, los más importantes son el ámbito de

medición o precisión.

1.3.3. Medición de Temperatura

La medición y el control de la temperatura es una parte fundamental de muchas industrias de proceso y de manufactura. Los termopares o termocuplas son los dispositivos más extensamente usados para medir temperatura debido a su robustez y amplia gama de temperaturas.

Un Detector de Temperatura Resistivo (RTD) es un sensor basado en el aumento de la resistencia de un metal con la temperatura. Consiste en un pequeño rollo de cable (cobre, platino o níquel) protegido por una funda de acero inoxidable, que se sumerge en el medio donde se medirá la temperatura y la resistencia del rollo es entonces una medición de temperatura. El ámbito de estos sensores se extiende desde -200°C hasta 600°C . Una de sus desventajas es que la medida de la resistencia requiere del paso de una corriente a través del alambre pudiendo disipar calor al medio y alterando la medición. Otra desventaja es que, excepto en los de platino, la relación entre temperatura-resistencia no es lineal (Creus, 2001; Ibrahim, 2006; Johnson, 1984).

1.3.4. Medición de Flujo

Junto con la temperatura, el flujo es una de las variables de proceso más comúnmente medidas, por ello se han desarrollado muchos tipos de sensores de flujo (Smith y Corripio, 1997). El flujo se refiere a la tasa de movimiento de una sustancia, que puede ser líquida, gaseosa o sólida. Un sensor muy común para medir el flujo de fluidos dentro de una tubería es el medidor de orificio, el cual consiste en un disco plano con un agujero maquinado; el disco se inserta en la línea de proceso perpendicular al flujo con la intención de producir una caída de presión. Otro tipo de sensor común es el medidor magnético de flujo. Los medidores de caudal más utilizados en la industria son aquellos que miden una diferencia de presión en el fluido al pasar por un elemento en la línea que crea una pérdida de carga. Para calcular el caudal volumétrico que pasa por

ese punto se recurre a la ecuación de Bernoulli. Los más típicos son la placa de orificio, más barata, y el tubo de Venturi, más caro, pero de mayor precisión.

1.3.5. Medición de Nivel

La medida de nivel se refiere a la profundidad de un material sólido o líquido dentro de un contenedor. Muchos sensores realizan estas mediciones, pero la mayoría dependen de la conversión del nivel en otra variable como el desplazamiento o la presión, que se mide con algún otro sensor como los descritos anteriormente (Johnson, 1984). Según (Smith y Corripio, 1997) los tres sensores de nivel de líquido más importantes son los de presión diferencial, los de flotador y los de burbujas.

En la industria la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador.

1.3.6. Compact WorkStation Festo

Para esta investigación se ha usado un módulo experimental, que es el módulo Compact WorkStation Festo, ya que en el que se puede controlar las variables de proceso de nivel, temperatura y flujo. El "Compact Workstation" de Festo (figura 1) es una pequeña planta hidráulica, con sensores, actuadores además tiene muchas posibilidades para desarrollar lazos de control de: nivel, caudal, y temperatura, para poder ver su funcionamiento a través de la implementación de un sistema y monitoreo y control.



Figura N° 1. Módulo WorkStation de Festo

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros técnicos del módulo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 1. Datos Técnicos del Módulo Compact WorkStation Festo

Parámetro	Valor
Máxima presión en el sistema de tuberías	50 kPa (0.5 bar)
Fuente de alimentación para la estación	24 V DC
dimensiones	700 x 700 x 907 mm
Velocidad de flujo de la bomba (Volumétrico)	~5 l/min
Volumen del tanque	10 l max.
Entradas digitales	7
Salidas digitales	5
Entradas analógicas	4
Salidas analógicas	2
Cantidad de tanques	2
Bomba (0...24 VDC)	voltaje 0...10 V
2/2W-válvula proporcional	voltaje 0...10 V
Elemento de calefacción 230 VAC (power 1000 W)	On/Off (control relay 24 VDC)
Sistema a lazo cerrado rango de trabajo para el control de nivel	0...10 l mm
Sensor de nivel rango de medición	0...9 l
Sensor de nivel de alcance de la señal	4...20 mA
Sistema a lazo cerrado rango de trabajo para el control de tasa de flujo	0...7 l/min
Sensor de flujo rango de medición	0,3...9,0 l/min
Sensor de flujo de alcance de la señal	0...1200 Hz
Sistema a lazo cerrado rango de trabajo para el control de la presión	0...30 kPa (0...300 mbar)
Sensor de presión rango de medición	0...10 kPa (0...100 mbar)
Sensor de presión de rango de señal	0...10 V
Sistema a lazo cerrado rango de trabajo para el control de temperatura	0...60° C
Sensor de temperatura rango de medición	-50° C...+150° C
Sensor de temperatura del rango de la señal	PT100

Fuente: Elaboración propia.

1.3.7. Control Automático

Uno de los objetivos de la ingeniería de automatización y control es mantener en un determinado valor de operación las variables de un proceso tales como:

temperatura, presión, flujo, velocidad, posición, concentración, etc. El diseño de un proceso fija los valores que deben asumir las variables significativas. La ingeniería del control automático determina los equipos, establece las estrategias de control y diseña los reguladores para procurar que la operación del proceso cumpla con alcanzar los valores de funcionamiento deseados.

Hay eventos externos totalmente imprevisibles que afectan el normal funcionamiento de una planta desviando a las variables de los valores deseados, por ejemplo, el desgaste de equipos o materiales, variaciones de parámetros o variables del entorno que afectan al proceso, cambios en el medio ambiente, etc. De no configurarse un adecuado sistema automático de control, las variables importantes del proceso, relacionadas con la seguridad, ahorro de energía, calidad del producto y los índices de producción, no cumplirán con las condiciones de diseño.

1.3.7.1. Sistema

Un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí, que producen señales de salida en función de señales de entrada. Las variables que afectan un proceso se clasifican en entradas, que denota el efecto de los alrededores sobre el proceso, y salidas, que denota el efecto del proceso sobre los alrededores. (figura 2) (Gomáriz et al., 1999; Molina, 1998).

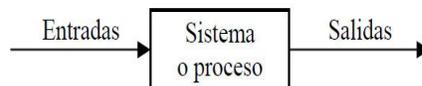


Figura N° 2. Principio de Caja Negra

Fuente: Elaboración propia

Los elementos principales de un lazo de control son el elemento de medición (sensor / transmisor), el elemento de decisión (controlador) y el elemento de acción (actuador / elemento final). Todo lazo de control debe contar con estos tres elementos para poder llevar a cabo la función de control. Un sistema bien

diseñado realiza la función de control con mayor velocidad y precisión que el ser humano. En ciertos procesos, los disturbios hacen que la variable controlada se desvíe del punto de consigna o Set Point, que es el valor deseado para la variable controlada. Los sistemas diseñados para compensar estos disturbios ejercen control regulatorio. Según la función que cumplan dentro del sistema físico, podemos clasificar las variables externas en: Entradas y Salidas.

Las Entradas son variables externas independientes del sistema, que afectan a las otras variables sean internas o de salida del sistema, pero no dependen del comportamiento intrínseco del mismo. Estas a su vez se subdividen en:

- Manipulables: son entradas cuya magnitud puede ser impuesta por un ente externo en forma previsible.
- Disturbios: variables causales cuya variación en el tiempo tiende a afectar adversamente al sistema.

Las salidas son variables externas dependientes, que representan la o las respuestas del sistema físico frente a un valor determinado de las entradas.

Las variables internas describen el comportamiento intrínseco del sistema tomando valores constantes o variables. Algunas de estas variables internas se pueden entender como parámetros cuando representan una propiedad física medible (por ejemplo, resistencia, capacidad, coeficiente térmico, densidad, etc.).

1.3.7.2. Estrategias de control automático

Los problemas de control se resuelven generalmente con un solo controlador, pero también existen distintos esquemas de control que combinan controladores y otros componentes como filtros, selectores y demás. Distintas estrategias de control automático se explican a continuación.

1.3.7.3. Control retroalimentado

En un sistema de control retroalimentado la variable controlada se mide por un

sensor, se transmite hacia el controlador, y se compara con el valor de referencia o punto de consigna, la diferencia entre ambas variables, conocida como el error, se utiliza para modificar la variable manipulada, tendiendo a reducir la diferencia, y este proceso se repite continuamente (figura 3) (Franklin et al., 1991).

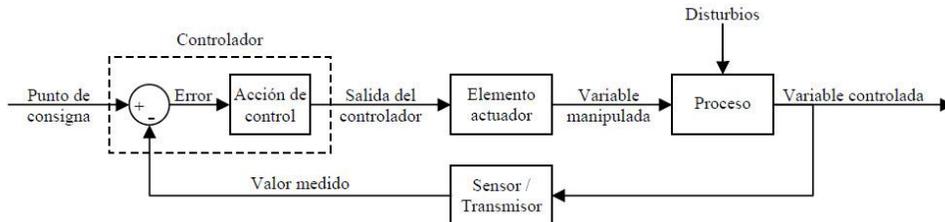


Figura N° 3. Diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado

Fuente: Elaboración propia

Este sistema de control posee la ventaja de ser una técnica muy simple para compensar todos los disturbios; cualquier disturbio que aleje a la variable controlada del punto de consigna hace que el controlador cambie su salida para regresarla al mismo.

1.3.7.4. Control adelantado

Los sistemas en los cuales la salida del proceso no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con una referencia, por lo que el controlador trabaja independientemente de la salida del proceso (figura 4). Ante un valor de entrada se espera una respuesta dada del sistema, por ello al control en lazo abierto también se le llama control adelantado (Ogata, 1998).

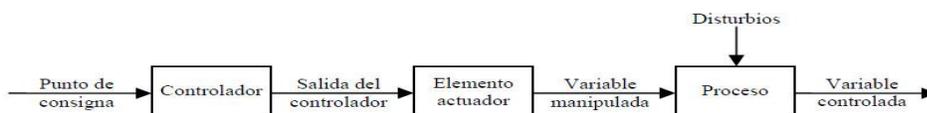


Figura N° 4. Diagrama de bloques de un sistema de lazo abierto. Fuente:

Elaboración propia

1.3.7.5. Diseño de los sistemas de control

La teoría clásica del control está ligada a procesos que tienen una entrada y una salida y cuyo análisis se realiza en los marcos del tiempo y la frecuencia, el diseño se realiza para satisfacer un ámbito de tolerancia con el fin de garantizar estabilidad y tiempos de respuesta adecuados. (Herra, 1985).

Los pasos a seguir para el diseño de un sistema de control se enumeran a continuación:

1. Se establece el problema y se dan las especificaciones de la planta.
2. Se plantea el modelo matemático y las ecuaciones diferenciales.

En control clásico:

3. Se determina el comportamiento del sistema, empleando métodos de análisis.
4. Se realiza la comprobación del control.
5. Si no se obtiene un comportamiento deseado, se añade equipo y se realiza ajustes por prueba y error.

En control moderno:

6. Se establece el parámetro a optimizar.
7. Se diseña la estructura necesaria para optimizar el parámetro.

1.3.7.6. Modelado de Procesos

El método fundamental para resolver un problema en ingeniería consiste en representarlo de una manera adecuada, de tal forma de lograr una sustitución del sistema real (equipo, proceso, etc.) por uno más adecuado para el tratamiento formal. Existen dos grandes maneras de modelar un sistema: Modelación en base a principios físicos y modelación empírica, en esta investigación se ha usado la segunda de ellas.

1.3.7.7. Modelación empírica

Esta técnica de modelación emplea datos experimentales. Hay varias razones

que justifican obtener el modelo de un sistema dinámico a partir de datos experimentales. En primer lugar, hasta el mejor de los modelos teóricos construido a partir de ecuaciones de leyes físicas, aún cuando sea exacto, es sólo una aproximación a la realidad.

Con el fin de diseñar un regulador fiable, se requieren o resultan más adecuados los modelos empíricos, otras veces, como en el caso de varios procesos químicos como la fabricación de papel o trabajos con metal, la teoría es muy aproximada. En todo caso, antes de que esté hecho el control final, es importante y prudente verificar el modelo teórico con datos experimentales. Existen varias técnicas empíricas de modelación, pero la que nos interesa en esta investigación es la técnica de identificación que almacena los datos obtenidos y en base a un algoritmo proporciona el modelo, en la figura 6 el método consiste en un algoritmo de identificación. Normalmente las entradas aplicadas a la planta son pseudoaleatorias.

1.3.8. Sistema de monitoreo y control

Un sistema de monitoreo y control es una aplicación software diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con los instrumentos y actuadores, e interfaz gráfica de alto nivel con el usuario (pantallas táctiles, ratones o cursores, lápices ópticos, etc.). El sistema permite comunicarse con los dispositivos de campo para controlar el proceso en forma automática desde la pantalla del ordenador, que es configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad.

1.3.8.1. Características del sistema de monitoreo y control

Los sistemas de monitoreo supervisan una la planta monitorizando las variables que en un momento determinado están actuando sobre la planta, además pueden variar las variables de control en tiempo real, algo que pocos sistemas permiten con la facilidad intuitiva que dan los sistemas de monitoreo y control.

1.3.8.2. Desarrollo del sistema de monitoreo y control con Labview

Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software de desarrollo basado en programación gráfica, orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación.

Los programas realizados en Labview se llaman instrumentos virtuales “VI’s”, ya que tienen la apariencia de los instrumentos reales, los cuales poseen analogías que se ven representadas en las estructuras y funciones de los lenguajes de programación convencionales. Un VI consta de dos interfaces: el panel frontal y el diagrama de bloques. El primero es la interface interactiva de usuario (figura 5), o interface máquina-usuario, en donde se encuentran los instrumentos para visualizar el proceso que se está realizando y que de cierto modo simula el panel de un instrumento físico, el cual se manipula por medio del teclado o con el mouse. Los VI’s reciben instrucciones del diagrama de bloques, construido en lenguaje G, el cual suministra una solución gráfica a un problema de programación. El diagrama de bloques (figura 6) es el código fuente de un VI.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs. A continuación, se procederá a realizar una somera descripción de estos conceptos.

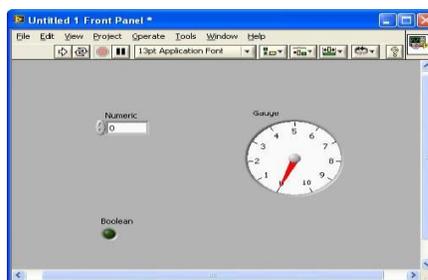


Figura N° 5. Panel Frontal Labview

Fuente: Elaboración propia

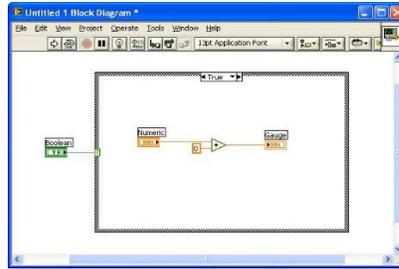


Figura N° 6. Diagrama de bloques Labview

Fuente: Elaboración propia

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Pregunta principal

¿Se logrará automatizar la manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento con la implementación de un sistema de monitoreo y control?

1.4.2. Preguntas específicas

¿Qué instrumentación industrial es necesaria para medir variables de proceso en tanques de almacenamiento?

¿Cómo lograr que las variables de proceso en tanques de almacenamiento se mantengan controladas dentro de un rango de operación?

¿Cómo mostrar los resultados de la respuesta en tiempo real de las mediciones de las variables de proceso en tanques de almacenamiento en una interfaz gráfica por computadora?

1.5. Justificación del estudio

Con el desarrollo de este trabajo se busca lograr un sistema de monitoreo y control configurado para automatizar la manipulación de variables de proceso

en tanques de almacenamiento, es importante lograr el monitoreo de las variables de proceso para realizar pruebas que permitan implementar estrategias de control para que los procesos sean estables, si se logra este conocimiento después se podría aplicar en una empresa ayudándole a reducir pérdidas por un mal control del sistema.

El desarrollo de este trabajo también busca que los alumnos realicen actividad experimental con plantas reales ya que esto aporta cosas importantes a la enseñanza en relación con otros métodos convencionales. Es importante para el estudiante realizar trabajos prácticos para que pueda comprender y aprender lo que se está estudiando. Los trabajos prácticos son una excelente forma de aprender las teorías de las ciencias de la ingeniería, en este caso sobre el control automático.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

Con la implementación de un sistema de monitoreo y control se logrará automatizar la manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Automatizar la manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento mediante la implementación de un sistema de monitoreo y control.

1.7.2. Objetivos Específicos

Identificar la instrumentación industrial para medir variables de proceso en tanques de almacenamiento.

Estabilizar las variables de proceso en tanques de almacenamiento mediante la implementación de estrategias de control.

Obtener la respuesta en tiempo real de las variables de proceso mediante la implementación del sistema de monitoreo con el software Labview en tanques de almacenamiento.

II. MÉTODO

2.1. Diseño de investigación

2.1.1. Tipo de estudio

El tipo de estudio de investigación es aplicada ya que la investigación se orienta a la solución de un problema vinculado a una utilidad práctica.

2.1.2. Diseño de Estudio

El tipo de diseño utilizado en la investigación corresponde a un pre experimental, ya que, a un grupo se le aplica una prueba previa al tratamiento experimental; después se le administra el tratamiento y finalmente se le aplica una prueba posterior al tratamiento.

G1: O1 X O2

G1: Tanques de Almacenamiento

O1: Variables de proceso

X: Implementación del Sistema de monitoreo y control

O2: Variables de proceso

2.2. Variables y operacionalización

- Variable independiente: Implementación del Sistema de monitoreo y control
- Variable dependiente: Manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento

2.2.1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Escala de medición
Independiente Implementación de un sistema de monitoreo y control	El sistema de monitoreo y control debe mostrar Indicadores a monitorear, variables a monitorear, valores estándares, tiempo e intervalos de monitoreo, gráficos de resultados, reportes de resultados, se encarga de analizar los resultados diarios del monitoreo y adoptar las acciones correctivas o preventivas requeridas.	La estabilidad del sistema se determina de acuerdo a varios criterios, en este caso se usará el criterio de Nyquist haciendo un análisis de la función de transferencia del proceso.	Estabilidad	Nominal
		La Respuesta en tiempo real consiste en verificar que las operaciones se realicen correctamente, es decir en el momento y con la duración adecuada. Medir la cantidad de tiempo que se lleva en realizar una tarea.	Tiempo de respuesta	Razón
Dependiente Manipulación de las variables de proceso	Son aquellas que pueden cambiar las condiciones de un proceso. En todo proceso existen diversas variables, las cuales afectan las entradas o salidas del proceso. Temperatura, nivel, flujo, presión, son las variables más comunes en los procesos industriales. Para el caso específico de los tanques de almacenamiento las variables a controlar son: temperatura, nivel y flujo.	Las variables de proceso de Nivel, Flujo y temperatura serán monitoreadas y controladas por medio de la instrumentación industrial del proceso en tanques de almacenamiento.	Valor de Nivel Valor de Flujo Valor de Temperatura	Razón

Fuente: Elaboración propia

2.3. Población y muestra

La población y muestra considerada en la investigación está conformada por los parámetros de funcionamiento de los tanques de almacenamiento mostrado en el apartado de teorías relacionadas al tema.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica que se ha utilizado para la investigación ha sido la observación directa del proceso en los tanques de almacenamiento.

En tabla N° 2 se muestra cada uno de los indicadores con su respectiva técnica e instrumento a utilizar para la recolección de datos.

Tabla N° 2. Técnica e Instrumentos de los Indicadores

Indicador	Técnica	Instrumento
Nivel, Flujo, Temperatura	Observación	Gráficas de observación
Estabilidad	Observación	Gráfica de reportes de Nyquist
Respuesta en tiempo Real	Observación	Gráfica de test de respuesta en tiempo real

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Métodos de análisis de datos

Se han usado algunas de las funciones del software Matlab para el análisis de datos. Matlab es un software de aplicaciones orientado a cálculos y gráficos de proyectos matriciales. Matlab integra el análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales, visualización de gráficas. Las funciones que se van a usar del software Matlab son las de Nyquist que permiten obtener gráficas para observar la respuesta en frecuencia de los sistemas.

2.6. Aspectos Éticos

El autor se compromete a respetar la autenticidad de los resultados y la confiabilidad de los datos encontrados.

III. RESULTADOS

3.1. Identificación de la Instrumentación industrial para medir variables de proceso en tanques de almacenamiento

En la tabla N° 3 se presenta la instrumentación industrial mínima necesaria para medir variables en tanques de almacenamiento, esta información se ha obtenido de la hoja de instrumentación que viene con el módulo Festo WorkStation.

Tabla N° 3. Instrumentación industrial para la medición de variables de proceso en tanques de almacenamiento

Variables	Requerimientos	Instrumentación	Cantidad
NIVEL	Medir el nivel del líquido del tanque de depósito B102.	Sensor analógico ultrasónico de nivel	1
	Medir el nivel mínimo y máximo de líquido del tanque	Sensores capacitivos de nivel	2
	Controlar el desbordamiento de líquido	Sensor de desbordamiento de seguridad	1
	Monitorear el nivel mínimo del tanque,	Interruptor de tanque (flotador), la posición del switch se cambia para indicar nivel decreciente.	1
	Suministrar un fluido desde un tanque de almacenamiento B101 al otro tanque de depósito B102	Bomba Centrífuga	1
FLUJO	Detectar el caudal que pasa a través del sistema de tuberías	Sensor opto electrónico de flujo	1
	Entregar el líquido desde el tanque B101 a través de la tubería hacia el tanque B102.	Bomba Centrífuga	2
TEMPERATURA	Medir temperatura	Sensor de temperatura PT100, el rango de medición es entre -50°C y 150°C.	1
	Elevar la temperatura del líquido que se encuentra en el tanque B101	Calentador	2

Este es el resultado del análisis de los requerimientos en cuanto a hardware sensorial para la medición de las variables de proceso en los tanques.

3.2. Estabilización del sistema mediante la implementación de estrategias de control para las variables de proceso en tanques de almacenamiento.

Para realizar las estrategias de control para las variables de proceso se hizo un experimento de identificación para cada una de las variables.

(Hurtado, 2006) en su trabajo “Modelamiento teórico y modelamiento empírico de procesos”, hace una síntesis de lo que es un proceso de identificación, explica que existen algunos procesos que son muy poco comprendidos y que es en estos casos donde las características del proceso deben ser identificadas a partir de la respuesta que brinden en función de las entradas que se le den al sistema, este procedimiento es conocido como identificación de procesos o de sistemas.

Este trabajo explica también que el proceso de construcción de un modelo empírico por medio de la identificación, consta de las siguientes etapas: la definición del problema, la formulación del modelo, la estimación de los parámetros y la validación del Modelo.

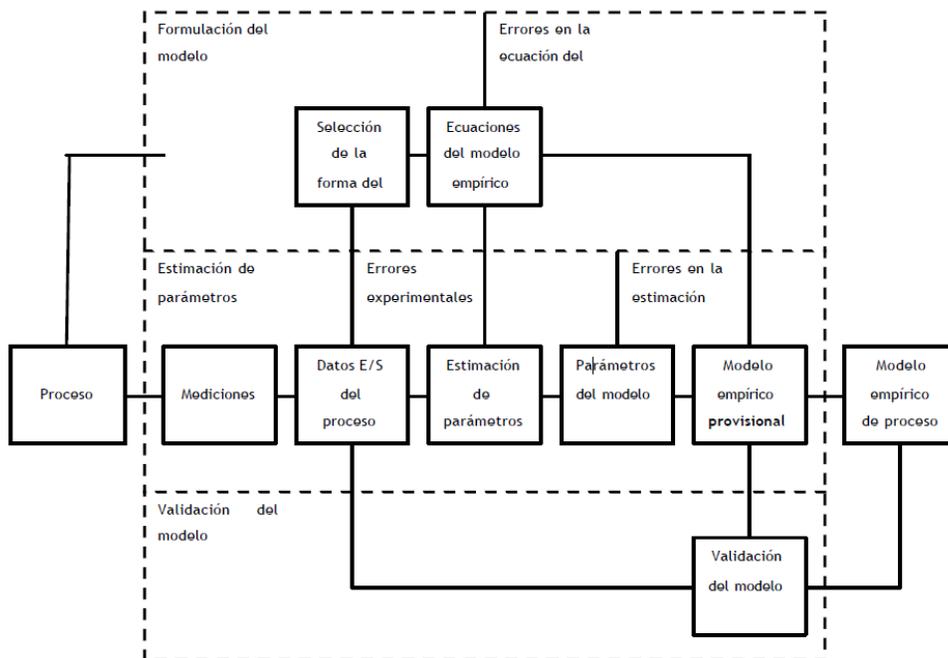


Figura N° 7. Esquema para un proceso de Identificación

Fuente: (Hurtado, 2006)

3.2.1. Resultados de la identificación de procesos

El objetivo de la identificación de procesos es obtener la función de transferencia de un sistema a partir del comportamiento entrada-salida del sistema real. A continuación se presenta un diagrama de flujo de cómo es que se realiza la identificación de procesos hasta hallar un controlador.

El experimento se planteó con el método de identificación no paramétrico, conocido como el método de la tangente, en donde se le dio al sistema varias entradas de tipo escalón para ver su respuesta en estado estacionario, y poder así determinar la no linealidad del sistema.

Para diseñar la señal de entrada es importante tener en cuenta lo que manifiesta el trabajo de (Rodríguez, et al., 2011) "Identificación y Diseño del Controlador para una Planta de Regulación de Presión" donde explican las características básicas para diseñar señales de entrada en los procesos de identificación: primero no forzar a los actuadores, es decir respetar su rango de trabajo, tampoco alterar las variables de proceso que se están controlando es decir no forzar mucho la planta y lo más importante que la señal sea tan pequeña como sea posible para que las plantas no pierdan mucho tiempo para seguir con la producción pero lo suficientemente larga para poder formar una señal que permita obtener un modelo aproximado de la planta.

Es por eso que se decidió que cada salto en la señal escalón fuera de 1 Voltio DC, esta señal fue enviada a la bomba, ya que al soportar la bomba un voltaje de 0 a 10 voltios y al hacer el primer salto y viendo que la respuesta del sistema tomaba un tiempo prudencial en estabilizarse; por ejemplo en el nivel alrededor de 30 minutos (figura 12), se creyó conveniente que los saltos sean de ese tamaño. Si se daban saltos más pequeños en la señal escalón, el tiempo de identificación iba ser mayor para conocer todo el comportamiento del proceso y se iban a tener muchas más funciones de transferencia y lo importante como explica el trabajo de (Rodríguez, et al., 2012) es diseñar una señal que no pierda mucho tiempo en el establecimiento para seguir con la producción y permita obtener un modelo aproximado de la planta.

Después del proceso de identificación se hallaron diferentes funciones de transferencia demostrando que los procesos son no lineales.

Al ser un módulo educacional se eligió trabajar en un rango de trabajo, en el caso del nivel se eligió trabajar entre 4 y 5 litros, en el caso de flujo entre 2 y 3 litros por minuto y en el caso de temperatura entre 0 y 80 °C, es por eso que se decidió analizar las funciones de transferencia en esos rangos de operación. En la tabla N° 4 se presentan los resultados del proceso de identificación.

Tabla N° 4. Identificación de procesos

	NIVEL	FLUJO	TEMPERATURA
PROCESO	No Lineal (Ver anexo 1)	No Lineal (Ver anexo 2)	No Lineal (Ver anexo 3)
FUNCIONES DE TRANSFERENCIA HALLADAS	$T_{0.87-0.91L}(S) = \frac{0.04}{60s + 1} e^{-2s}$ $T_{0.91-1.175L}(S) = \frac{0.265}{35s + 1} e^{-5s}$ $T_{1.175-1.66L}(S) = \frac{0.485}{60s + 1} e^{-3s}$ $T_{1.66-2.3L}(S) = \frac{0.64}{74s + 1} e^{-s}$ $T_{2.3-3.14L}(S) = \frac{0.84}{94s + 1} e^{-s}$ $T_{3.14-4.2L}(S) = \frac{1.06}{115s + 1} e^{-s}$ $T_{4.2-5.4L}(S) = \frac{1.2}{144s + 1} e^{-s}$ $T_{5.4-6.71L}(S) = \frac{1.31}{152s + 1} e^{-s}$ $T_{6.71-8.17L}(S) = \frac{1.46}{179s + 1} e^{-s}$ $T_{8.17-8.755L}(S) = \frac{0.585}{181s + 1} e^{-s}$	$T_1(S) = \frac{0.5255}{1.03s + 1} e^{-0.1s}$ $T_2(S) = \frac{0.47}{1.25s + 1} e^{-0.55s}$ $T_3(S) = \frac{0.31}{1.587s + 1} e^{-0.1s}$	$T_{0-80^{\circ}C}(S) = \frac{2.075}{3036s + 1} e^{-48s}$ $T_{80-170^{\circ}C}(S) = \frac{2.4}{4260s + 1} e^{-36s}$ $T_{170-303^{\circ}C}(S) = \frac{2.8}{4200s + 1} e^{-60s}$
Función de transferencia elegida para analizar estabilidad	$T_{4.2-5.4L}(S) = \frac{1.2}{144s + 1} e^{-s}$	$T_2(S) = \frac{0.47}{1.25s + 1} e^{-0.55s}$	$T_{0-80^{\circ}C}(S) = \frac{2.8}{4200s + 1} e^{-60s}$

3.2.2. Resultados del análisis de la estabilidad de los procesos

A continuación se presentan los resultados del análisis de la estabilidad de los procesos con la función de transferencia elegida.

3.2.2.1. Diagrama de Nyquist para la medición de nivel

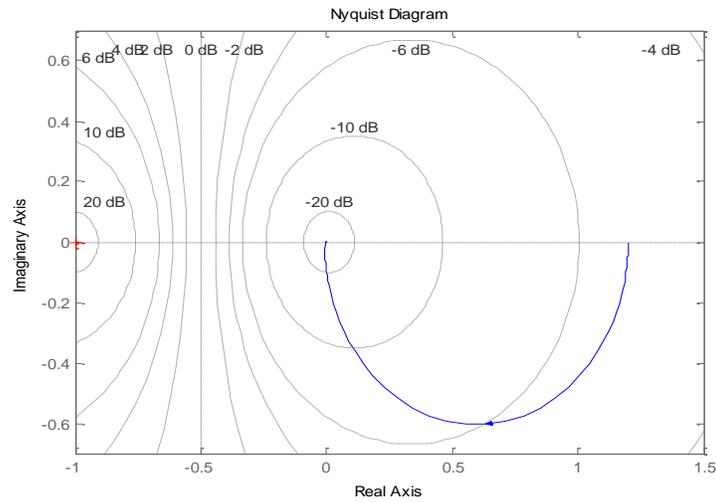


Figura N° 8. Diagrama de Nyquist para la FT de Nivel. Fuente: Elaboración propia

La figura 8 muestra que el diagrama de Nyquist no envuelve al punto -1, por lo tanto, el sistema es estable a lazo cerrado y si es posible realizarle un control.

3.2.2.2. Diagrama de Nyquist para la medición de flujo

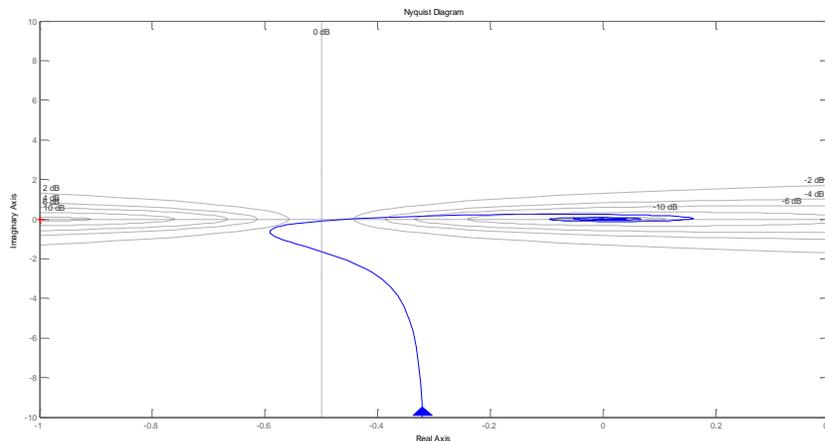


Figura N° 9. Diagrama de Nyquist para la FT de Flujo. Fuente: Elaboración propia

En la figura 9 se muestra que el diagrama de Nyquist no envuelve al punto -1,

por lo tanto, el sistema es estable a lazo cerrado

3.2.2.3. Diagrama de Nyquist para la medición de temperatura

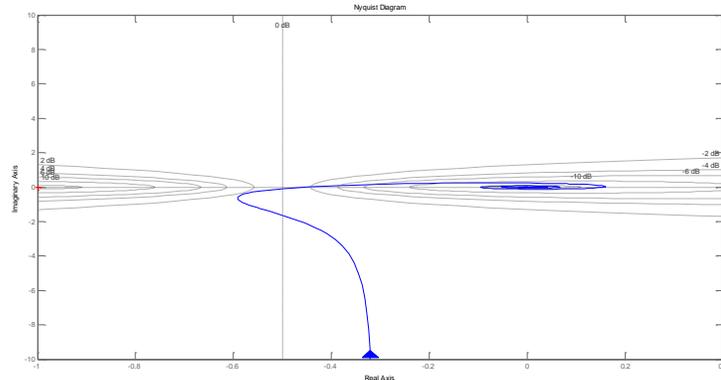


Figura N° 10. Diagrama de Nyquist para la FT de Temperatura. Fuente: Elaboración propia

En la figura 11 se muestra que el diagrama de Nyquist no envuelve al punto -1, por lo tanto, el sistema es estable a lazo cerrado.

3.2.3. Resultados del cálculo de parámetros para el controlador para los procesos

Una vez seguro que los procesos son controlables a lazo cerrado se procedió a sintonizar los controladores PID según los parámetros de sintonización de Ziegler Nichols.

Vale recalcar que al ser un sistema no lineal los parámetros encontrados son para un determinado punto de trabajo, si se quisiera controlar en otros niveles el sistema debería cambiar la función de transferencia y los parámetros.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 5. Parámetros para el control PID

Control elegido	K	Ti	Td
PID Nivel	113.76	1.99	0.497
PI Flujo	3.592	1.53	

PI Temperatura	15.6	193.328	
----------------	------	---------	--

Para el proceso de Nivel se utilizó un PID porque el valor de T_d que se halló no fue tan bajo como para los otros procesos, también se vió en algunos trabajos de la literatura por ejemplo (Uribe, et al., 2014) en su trabajo “Controlador PID para Nivel de Tanque de la Unidad Didáctica” hace una comparación de un PI y un PID para un proceso de Nivel donde si lo que importa es el tiempo de establecimiento, el PID se comporta mejor con un tiempo de 6,77 segundos versus el PI que tiene un tiempo de establecimiento de 12,7 segundos. Es así que demuestra que el controlador PID es más rápido y presenta mejores características que un PI.

Para los otros procesos en las pruebas que se hicieron el control PI y el control PID son muy parecidos ya que la constante T_d obtenida es de un valor muy bajo y despreciable; también se vió que incrementar mucho la acción derivativa en el sistema produce que la bomba se esfuerce demasiado pudiendo disminuir el tiempo útil del actuador (figura 39).

Para la variable flujo se obtiene un control muy satisfactorio solamente aplicando los parámetros K_c y T_i , es decir haciendo solamente un control Proporcional – Integral. Al momento de introducir la ganancia derivativa el sistema mejora en la parte transitoria disminuyendo su sobrepico, pero en el estado estable es muy susceptible a pequeñas variaciones de flujo. Se decidió por un PI apoyados en el trabajo de (Pezzoti, et al., 2010) donde demuestra con un control PI es suficiente para un sistema de flujo cuando el sistema se aproxima a una función de primer orden tal como es el caso de esta investigación.

Para el caso de temperatura el valor de T_d también resultó bajo, es por eso que se decidió por sólo un controlador PI, además si se variaba el T_d el tiempo de establecimiento se hacía mayor, esto también lo demuestra (Betancor, et al., 2003) donde hacen una comparación entre el PI y PID, muestran que existe solo una ligera diferencia entre el PI y PID. Donde la respuesta del sistema con el PID es más amortiguada pero más lenta, es así que si se quiere un tiempo de establecimiento rápido con un PI es suficiente.

3.3. Obtención la respuesta en tiempo real de las variables de proceso mediante la implementación del sistema de monitoreo con el software Labview en tanques de almacenamiento.

Para la obtención de la respuesta en tiempo real se ha utilizado el Programa Labview donde se ha creado una plataforma de adquisición de datos (ver imagen en anexo 4). Además, se ha hecho uso de un PLC Direct Logic 06, encargado de recoger los datos analógicos en voltaje, procedentes de los sensores convertirlos a digital y enviarlos a la plataforma de datos hechos en Labview. Los módulos de entrada y salida de voltaje, van conectados al PLC Direct Logic 06, estos módulos son los que permiten ingresar y sacar señales analógicas en voltaje. La implementación de los controladores se realizó dentro del código G del software Labview.

3.3.1. Resultados de la implementación del sistema de monitoreo y control

La imagen en el anexo 5 muestra la respuesta en tiempo real para el proceso de nivel cuando se le dio un set point de 5 litros para el nivel, observando como la variable de proceso llega al valor de referencia demostrando que el proceso es estable y controlado.

La imagen en el anexo 6 muestra la respuesta en tiempo real para el proceso de flujo cuando se le dio un set point de 3 litros para el flujo observando como la variable de proceso llega al valor de referencia demostrando que el proceso es estable y controlado.

La imagen en el anexo 7 muestra la respuesta en tiempo real para el proceso de temperatura cuando se le dio un set point de 50°C para temperatura observando como la variable de proceso llega al valor de referencia demostrando que el proceso es estable y controlado.

También se pueden ver más pruebas realizadas a las variables de proceso en los anexos 8, 9, 10.

3.4. Contrastación de hipótesis

Se ha podido identificar la instrumentación industrial mínima necesaria para medir variables de proceso en tanques de almacenamiento, también se ha logrado estabilizar esas variables de proceso con las estrategias de control implementadas y por último se ha logrado obtener la respuesta en tiempo real de las variables de proceso mediante la implementación del sistema de monitoreo con el software Labview. Por lo tanto al cumplir estos objetivos queda demostrada la automatización de la manipulación de variables de proceso en tanques de almacenamiento el cual era nuestro objetivo general.

IV. DISCUSIÓN

En la instrumentación industrial para el proceso de medición de nivel se evaluó el sensor ultrasónico de nivel y el sensor capacitivo de nivel, ambos sensores trabajan a 24 v, estas señales son entradas para el PLC y están conectadas en el terminal de E/S del módulo de conectores XMA1 de la planta piloto. Para el proceso de medición de flujo se usó una bomba centrífuga y un sensor de flujo, la bomba suministra un fluido desde el depósito a través de las tuberías de la planta, es accionada con una señal binaria o una señal analógica de 0 – 10 V, y el caudal es detectado por medio del sensor de flujo opto electrónico. Para el proceso de medición de temperatura se contó dentro de la instrumentación con un sensor de temperatura PT 100, este sensor puede medir entre -50°C y 150°C , este sensor mide en el punto de 'TIC B104' que es una posición dentro del tanque 1 sacando un valor real. El valor real debe ser mantenido en una cierta temperatura también si se producen cambios o disturbios. Así como (Estrella, 2007) realiza una descripción del hardware para el control de tanques de almacenamiento, en esta tesis también se realizó la descripción del hardware detallando la instrumentación industrial para los procesos de medición de nivel, flujo y temperatura.

Una vez identificada la instrumentación industrial para cada proceso se hizo el estudio de las respectivas estrategias de control. Para lo cual se realizó un experimento de identificación para cada una de las variables, este experimento consistió en ingresar una entrada al sistema y evaluar su respuesta en la salida. Se obtuvo diferentes funciones de transferencia por cada proceso eligiéndose una sola para poder aplicar la técnica de Ziegler y Nichols obteniendo los valores de K_p , K_i y T_d para realizar un control PID adecuado, ver tabla 5. El control PI y el control PID son muy parecidos ya que la constante T_d obtenida es de un valor muy bajo; sin embargo, se nota claramente que el parámetro T_d logra corregir un poco el sobrepico que se tiene en la respuesta del sistema con control PI. También es necesario mencionar que incrementar mucho la acción derivativa en el sistema produce inestabilidad en el mismo. Por ejemplo para la variable flujo se obtiene un control muy satisfactorio solamente aplicando los parámetros K_c y T_i , es decir

haciendo solamente un control Proporcional – Integral. Al momento de introducir la ganancia derivativa el sistema mejora en la parte transitoria disminuyendo su sobrepico, pero en el estado estable es muy susceptible a pequeñas variaciones de flujo. Así como (Oliveira, 2002), realizó un experimento de identificación, ingresándole a cada proceso una entrada escalón y PRBS para ver su respuesta en estado estacionario, y poder así determinar la no linealidad del sistema en esta tesis se siguió ese modelo para los tres procesos a controlar, lo que cambiaba eran los sensores de donde se obtenían los datos en forma analógica. Una vez obtenidas las funciones de transferencia se hizo un estudio con los diagramas de Nyquist para ver si el sistema es estable a lazo cerrado, después de comprobar esto se procedió a elegir una función de transferencia de las que se había hallado para sintonizar un PID a través de los parámetros de sintonización de Ziegler Nichols.

Para la respuesta en tiempo real de las variables de proceso, se desarrolló la interfaz gráfica para la visualización del comportamiento y manipulación en tiempo real de las variables de proceso estudiadas respecto a los setPoint ingresados. Sin una interfaz gráfica no es posible manipular en tiempo real las variables de proceso, para lograrlo la interfaz fue desarrollada en LabView que en general es una herramienta óptima para desarrollar aplicaciones de supervisión y control. La programación es muy fácil e intuitiva cuando se realizan las operaciones básicas para las que está configurado, los ejemplos en los manuales de National Instrument son de gran ayuda a la hora de programar y hay muchas funciones (VI) como los bloques de programación del controlador PID que permiten cumplir el objetivo de manipular las variables de proceso en tanques de almacenamiento desde una interfaz software por computadora. Así como (Richmond, 2009) explica en su trabajo la importancia de los sistemas SCADA, en esta investigación se desarrolló una interfaz para cada proceso industrial a monitorear: como resultado se obtuvo una interfaz gráfica para el control de temperatura, una interfaz para el control de nivel, y otra para el control de flujo.

V. CONCLUSIONES

La identificación de la instrumentación industrial que se usa en este módulo, se recurrió al catálogo del fabricante del Compact Workstation Festo, el cual nos que indica los parámetros técnicos permisibles para el correcto funcionamiento de los procesos a monitorear y controlar en el módulo de tanques de almacenamiento, como son los sensores ultrasónicos, capacitivos, sensor de flujo y sensor de temperatura PT100.

La implementación de estrategias de control para las variables de proceso en tanques de almacenamiento se siguió un determinado patrón, obteniéndose, que el control PI es el más adecuado al momento de realizar control de flujo y temperatura y el PID para el control de nivel con el objetivo de mantener los procesos estables. Para el control de nivel los valores hallados fueron los siguientes: $K = 113.76$, $T_i=1.99$, $T_d=0.497$, para el control de flujo fueron: $K = 3.592$, $T_i=1.53$, y para el control de temperatura fueron $K=15.6$, $T_i=193.33$.

El sistema de monitoreo y control, se construyó gráficamente de una manera muy sencilla, se usó la interface Control PID en la cual el usuario puede probar los controles en tiempo real, y además fueron probados usando la interfaz del Labview en la cual el usuario puede obtener la respuesta de la planta. El software Labview también permite dentro de sus bloques armar un controlador PID, se utilizaron también controles que sirvieron de indicadores numéricos para visualizar las mediciones de los diferentes procesos a monitorear. También se comprobó que el programa funcionó de forma correcta, la selección de las constantes funcionó adecuadamente en todos los procesos industriales descritos como se muestran en las figuras de los anexos 8, 9, 10 del documento.

El objetivo general era facilitar la manipulación de las variables de proceso en tanques de almacenamiento mediante la implementación de un sistema de monitoreo y control, es decir desarrollar toda una plataforma que permitiese la comunicación entre el usuario y el sistema a controlar, de tal forma que pudiese supervisar y monitorear las variables de los procesos como nivel, flujo, temperatura visualizadas en el monitor de un ordenador. Las pruebas demuestran que las

constantes halladas logran la estabilidad de los procesos estudiados. Por lo tanto después de haber alcanzado los objetivos específicos y a la luz de los resultados encontrados se concluye que se ha automatizado la manipulación de las variables de proceso con el sistema de monitoreo y control descrito para tanques de almacenamiento.

VI. RECOMENDACIONES

El sistema real no es un sistema lineal como ha quedado demostrado y por tal motivo las variaciones de referencia deben hacerse alrededor del punto de operación. Al momento ingresar parámetros diferentes a los óptimos, siempre se debe tratar de mantener la relación entre K_c y T_i y además estos valores deben mantenerse cercanos a los valores óptimos. Mantener esta relación hará que el sistema tenga una respuesta similar y que no presente oscilaciones que puedan afectar el funcionamiento correcto de algún elemento.

Vale recalcar que estos parámetros encontrados son para un determinado punto de trabajo, si se quisiera controlar en otros niveles el sistema debería cambiar automáticamente la función de transferencia y los parámetros.

También es recomendable que futuras investigaciones estudien otros tipos de control avanzando ya sea control predictivo o control no lineal para optimizar la utilización de recursos en los procesos a controlar.

Por otro lado siempre es recomendable que el usuario del módulo se familiarice con el equipo y con el funcionamiento de los elementos, principalmente de los sensores, ya que son de diferentes tipos y tienen una operatividad distinta, lo que influye en su forma de trabajar, para esto es de mucha ayuda el manual del WorkStation Festo.

VII. REFERENCIAS

- Betancor, C., Cerezo, J., Vega, A. Diseño de un sistema de control de temperatura. Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA), Universidad de Las Palmas de G.C, 2003.
- Campos, P. Diseño e implementación de una interfaz para el control de un módulo educativo utilizando una PC para un laboratorio remoto-virtual de comunicaciones. Tesis. Universidad Católica del Perú, 2011.
- Creus, A. Instrumentación industrial (6ª ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: Alfaomega Marcombo. (Reimpreso a partir de la edición orinal de 1997). 2001.
- Franklin, G. F., Powell, D. J., & Emami-Naeini, A. Control de sistemas dinámicos con retroalimentación (Trads. J. A. Carranza, V. H. del Valle). Wilmington, Delaware: Addison-Wesley Iberoamericana.1991.
- Estrella, A. “Diseño E Implementación Del Sistema Para El Control Y Supervisión De Tanques De Almacenamiento De Aceite Palmiste”, Ecuador, 2007.
- Festo. Manual Didáctico Festo WorkStation. 2011.
- Gomáriz, S., Biel, D., Matas, J., y Reyes, M. Teoría de control: diseño electrónico. México D.F.: Alfaomega.1999.
- Herra, G. A. Construcción de los módulos básicos de un controlador automático. Proyecto de graduación para optar por el grado de Bachillerato en Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 1985.
- Hunter, R. P. Automated process control systems: concepts and hardware. Nueva Jersey: Prentice-Hall.1978.
- Hurtado, L. L. Modelamiento teórico y modelamiento empírico de procesos, una síntesis. Scientia et Technica Año XII, Vol No 31, Agosto 2006.
- Ibrahim, D. Microcontroller based applied digital control. Sussex del Oeste, Inglaterra: John Wiley & Sons. 2006.
- Ipanaqué, W., Belupú I., Aguirre, D. Desarrollo de Software SCADA para Supervisar y Monitorear Procesos Industriales. Proceeding Congreso Latinoamericano de Control Automático. Lima Perú, 2012, pp 127.

- Johnson, C. D. Microprocessor-based process control. Nueva Jersey: Prentice-Hall.1984.
- Martínez, M. Diseño del subsistema mecánico-eléctrico para un sistema de control de temperatura de un tanque. Tesis Universidad Católica del Perú, 2011.
- Molina, D. Implementación de un sistema de control automático para un biorreactor utilizando un controlador lógico programable. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.1998.
- Mott, R. L. Mecánica de fluidos aplicada (4ª ed.) (Trad. C. R. Cordero, A. H. Flores).1996. México D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana. (Trabajo original publicado en 1994).
- Ogata, K. Ingeniería de control moderna (3ª ed.) (Trad. M. A. Martínez). México: Prentice- Hall Hispanoamericana. (Trabajo original publicado en 1997). 1998.
- Pezzoti, G., Londoño, N., Valencia, J. Control PI de un sistema de flujo identificado mediante redes Neuronales. Universidad de Antioquia, 2010.
- Polke, M. (Ed.). Process control engineering. Weinheim, Alemania: VCH. 1994.
- Quintero, L., Moya, C. Software orientado a sistemas de control HMI/Scada usando recursos libres y de código abierto, desarrollado sobre plataforma Linux. Repositorio Digital de la Universidad San Francisco de Quito. Ecuador. 2009.
- Richmond, E. Diseño y construcción de una interfaz de control de nivel, temperatura y flujo de agua en un tanque para uso en prácticas de laboratorio. Universidad Rodrigo Facio. Costa Rica. 2009.
- Rodríguez, C. D., Rojas, L. A., Martín C., A. Identificación y Diseño del Controlador para una Planta de Regulación de Presión. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC) Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Setiembre 2011.
- Oliveira, R., Georgieva, P., Foyo, P., Plant and Equipment | Instrumentation and Process Control: Instrumentation, In: Editor-in-Chief: John W. Fuquay, Editor(s)-in-Chief, Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition), Academic Press, San Diego, 2002, Pages 234-241, ISBN 9780123744074.
- Smith A., Corripio, A. Control Automático de Procesos Teoría y Práctica. 1997.

Uribe, G. F., Castro, E. F., Osorio, E. Control PID para Nivel de Tanque de la Unidad Didáctica RT614 Gunt Hamburg. Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad Francisco de Paula Santander, 2014.

ANEXO 1: Gráficas de la identificación de la no linealidad del proceso de nivel

Según la figura siguiente se aplicó el método de identificación no paramétrico, conocido como el método de la tangente, en donde se le dio al sistema varias entradas de tipo escalón para ver su respuesta en estado estacionario, y poder así determinar la no linealidad del sistema (figura 12).

Cada salto en la señal escalón fue de 1 Voltio DC, esta señal fue enviada a la bomba, a medida que va aumentando el voltaje de entrada en la bomba, el nivel va aumentando también.

Este experimento al ser de escalón unitario se debía esperar a que el sistema llegue a un valor estacionario, es por eso que se le dejaba al escalón un tiempo prudencial.

A continuación, se muestra la respuesta del sistema en el dominio del tiempo ante la entrada escalón, esta señal fue capturada por el sensor ultrasónico de nivel y convertida a volumen.

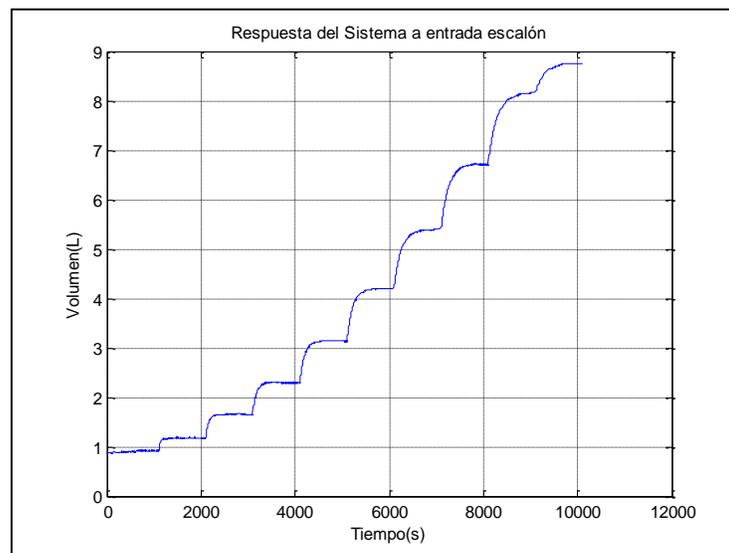


Figura N° 12. Respuesta del Sistema a señal escalón

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la figura 13 se muestra la señal escalón que se dio. Cabe decir,

que esta señal escalón es en Voltaje, esta señal eléctrica es entregada al actuador, en este caso la bomba.

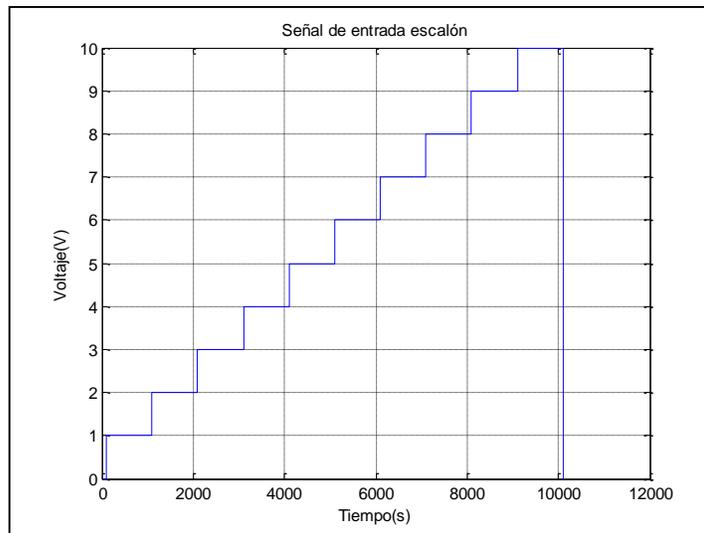


Figura N° 14. Señal Escalón ingresada al sistema

Fuente: Elaboración propia

La figura 15 nos muestra la respuesta de la ganancia estática del sistema respecto a la señal de entrada (señal escalón).

Como podemos apreciar, las funciones de transferencia tienen distinta ganancia estática y distinta constante de tiempo, quedando comprobado que el sistema tiene una característica no lineal.

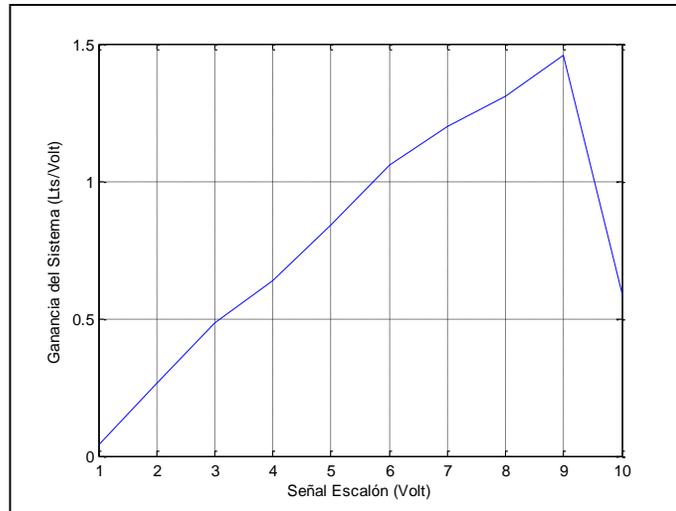


Figura N° 15. Ganancia estática vs señal escalón

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2: Gráficas de la identificación de la no linealidad del proceso de flujo

Según la figura 16 se aplica el método de identificación no paramétrico, conocido como el método de la tangente, en donde se le dio al sistema varias entradas de tipo escalón para ver su respuesta en estado estacionario, y poder así determinar la no linealidad del sistema. Cada salto en la señal escalón fue de 1 voltio DC, esta señal fue enviada a la bomba, a medida que va aumentando el voltaje de entrada en la bomba el caudal va aumentando también.

A continuación, en la figura 16 se muestra la respuesta del sistema en el dominio del tiempo ante la entrada escalón, esta señal fue capturada por el sensor de flujo y convertida a caudal.

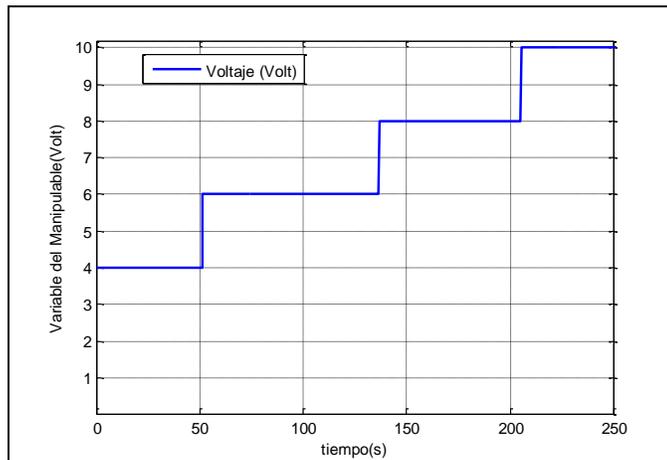


Figura N° 16. Señal Escalón ingresada al sistema. Fuente: Elaboración propia

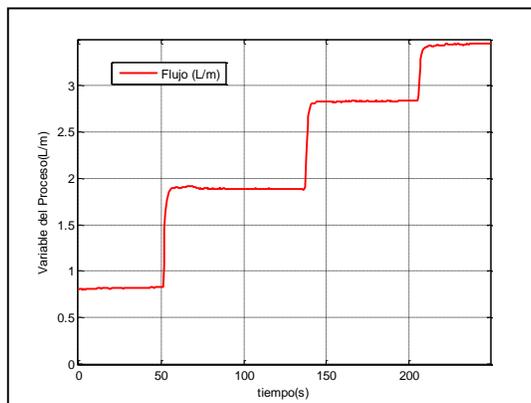


Figura N° 17. Respuesta del sistema a señal escalón. Fuente: Elaboración propia

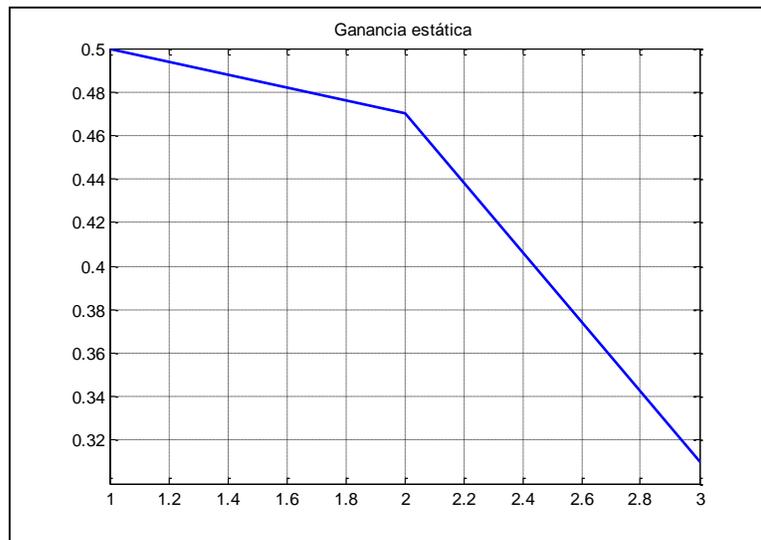


Figura N° 18. Ganancia estática vs señal escalón
Fuente: Elaboración propia

Como podemos apreciar, las funciones de transferencia tienen distinta ganancia estática y distinta constante de tiempo, quedando comprobado que el sistema tiene una característica no lineal.

ANEXO 3: Gráficas de la identificación de la no linealidad del proceso de temperatura

Según la figura 19 se aplica el método de identificación no paramétrico, conocido como el método de la tangente, en donde se le dio al sistema varias entradas de tipo escalón para ver su respuesta en estado estacionario, y poder así determinar la no linealidad del sistema.

Cada salto en la señal escalón fue de 1 voltio DC, esta señal fue enviada a la bomba, a medida que va aumentando el voltaje de entrada en la bomba la temperatura va aumentando también.

A continuación, se muestra la respuesta del sistema en el dominio del tiempo ante la entrada escalón, esta señal fue capturada por el sensor de temperatura y convertida a grados centígrados.

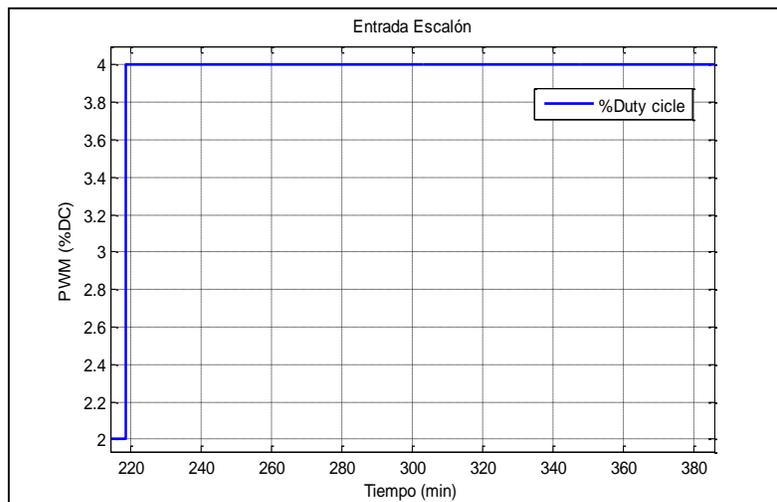


Figura N° 19. Señal Escalón ingresada al sistema
Fuente: Elaboración propia

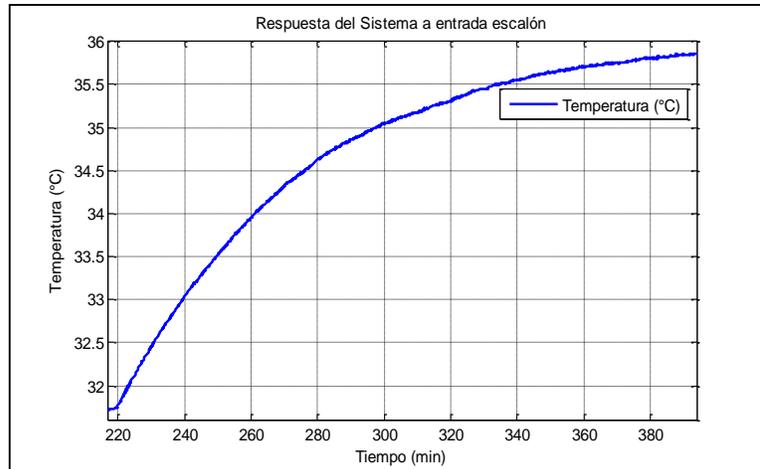


Figura N° 20. Respuesta del Sistema a señal escalón
Fuente: Elaboración propia

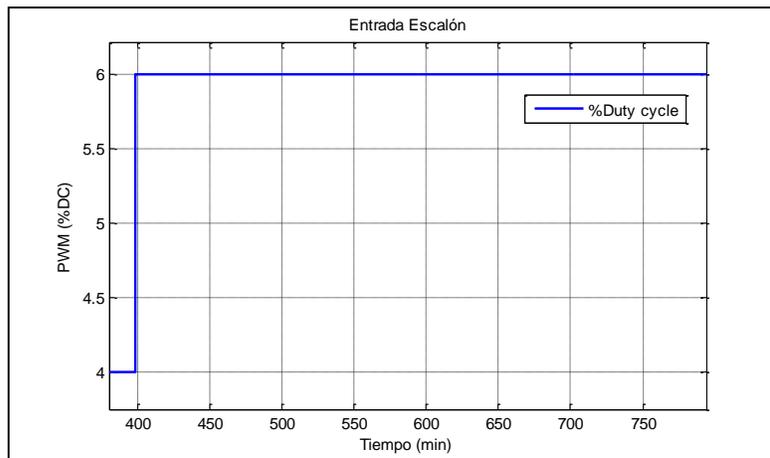


Figura N° 21. Señal Escalón ingresada al sistema
Fuente: Elaboración propia

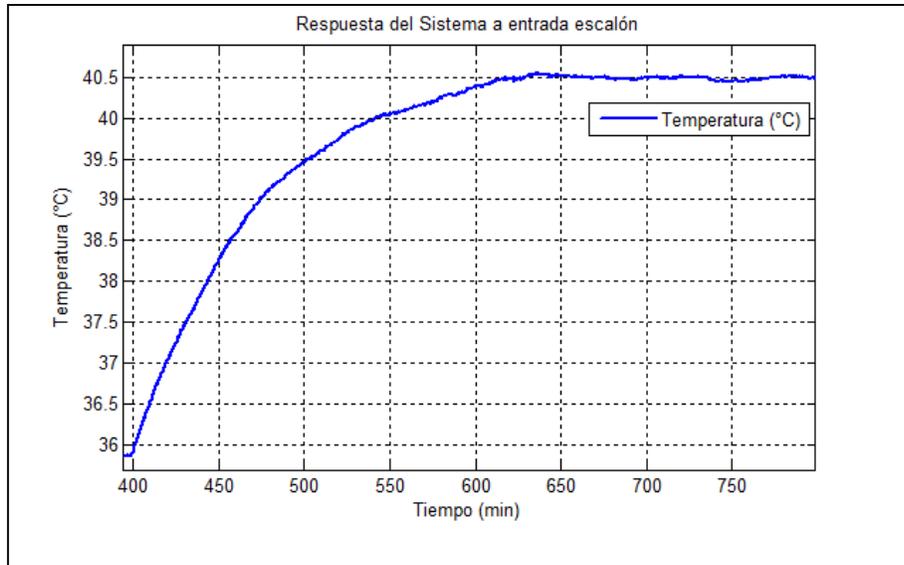


Figura N° 22. Respuesta del Sistema a señal escalón
Fuente: Elaboración propia

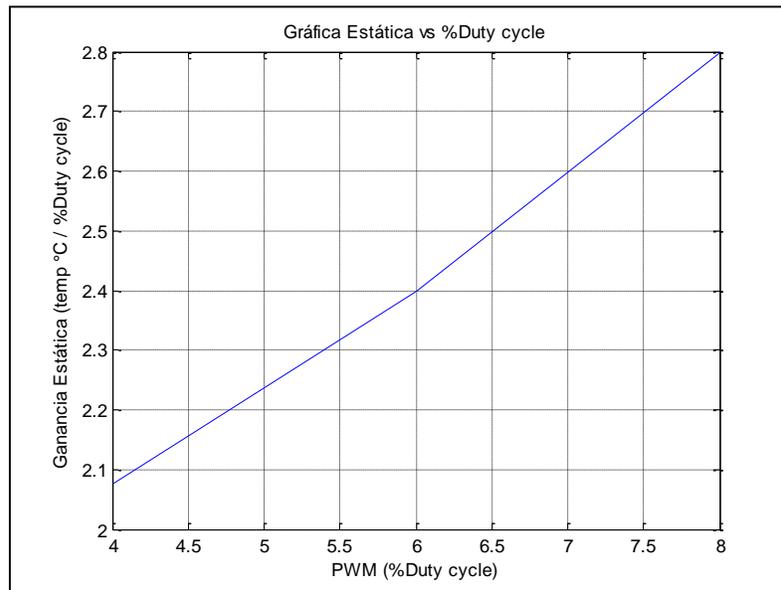


Figura N° 23. Ganancia estática vs señal escalón

Como podemos apreciar, las funciones de transferencia tienen distinta ganancia estática y distinta constante de tiempo, quedando comprobado que el sistema tiene una característica no lineal.

ANEXO 4: Esquema para la obtención de la respuesta en tiempo real

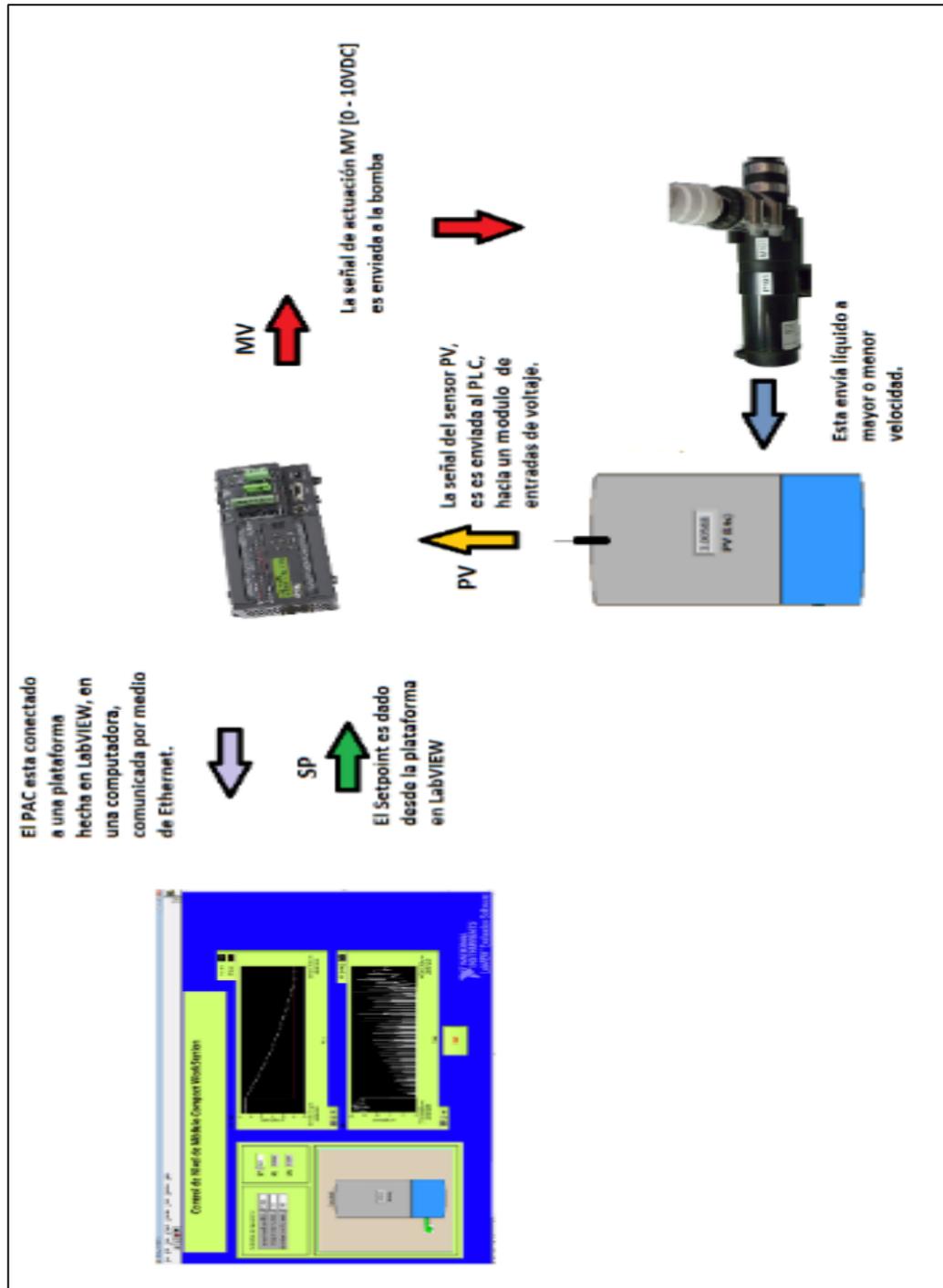


Figura N° 24. Esquema para la obtención de la respuesta en tiempo real. Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5: Interfaz gráfica para la obtención de la respuesta en tiempo real para el proceso de nivel

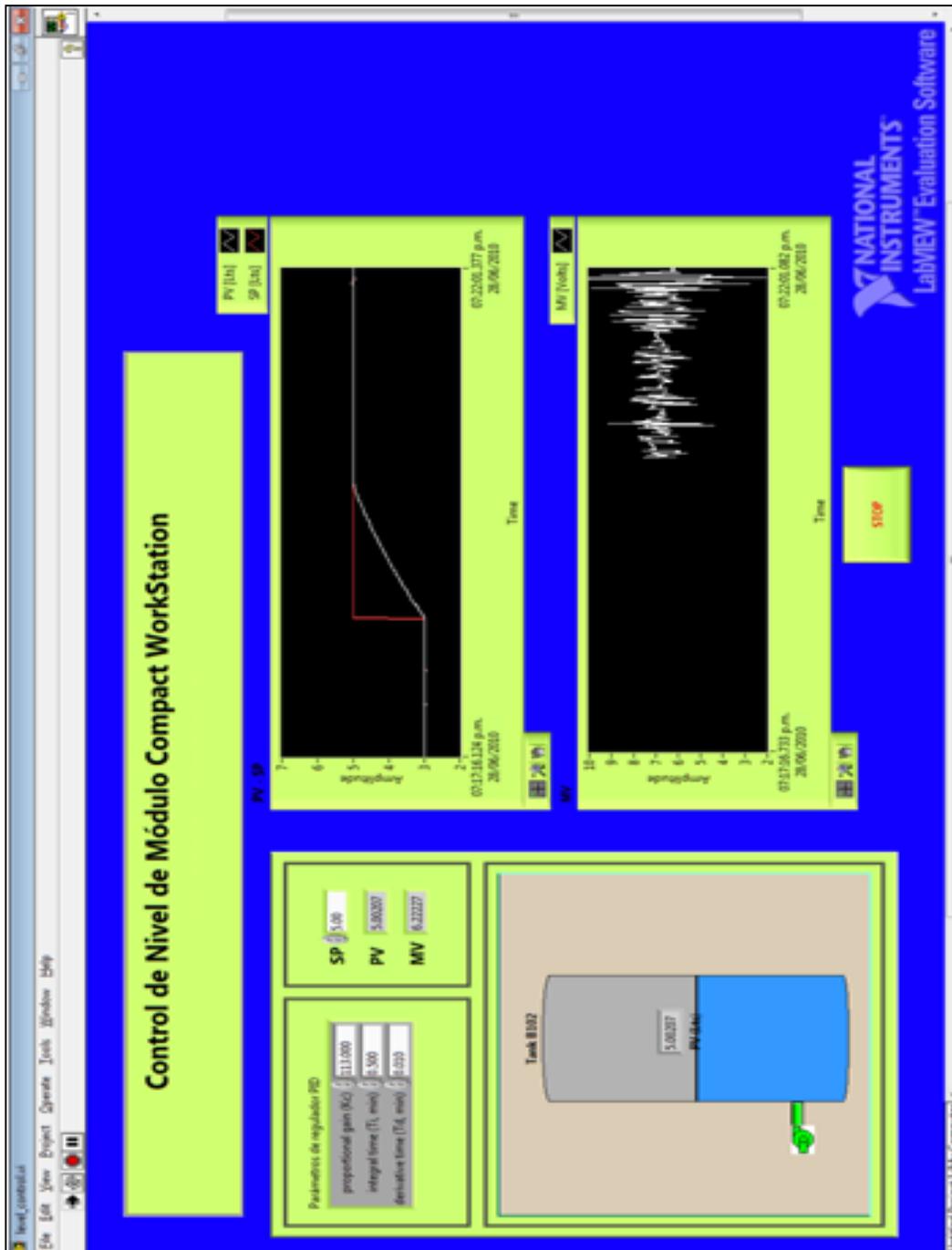


Figura N° 25. Interfaz gráfica para temperatura. Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6: Interfaz gráfica para la obtención de la respuesta en tiempo real para el proceso de flujo

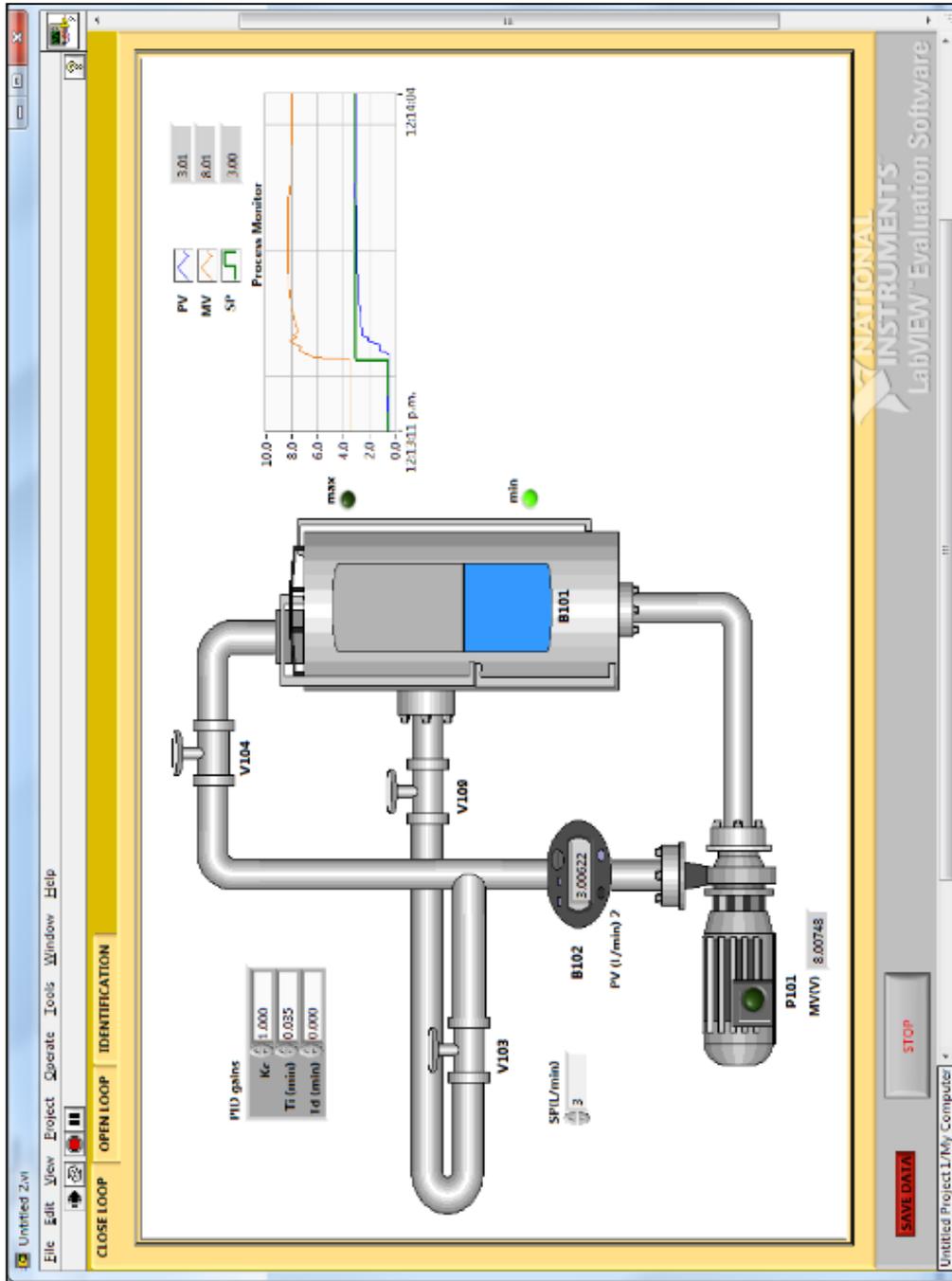


Figura N° 26. Interfaz gráfica para flujo. Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7: Interfaz gráfica para la obtención de la respuesta en tiempo real para el proceso de temperatura

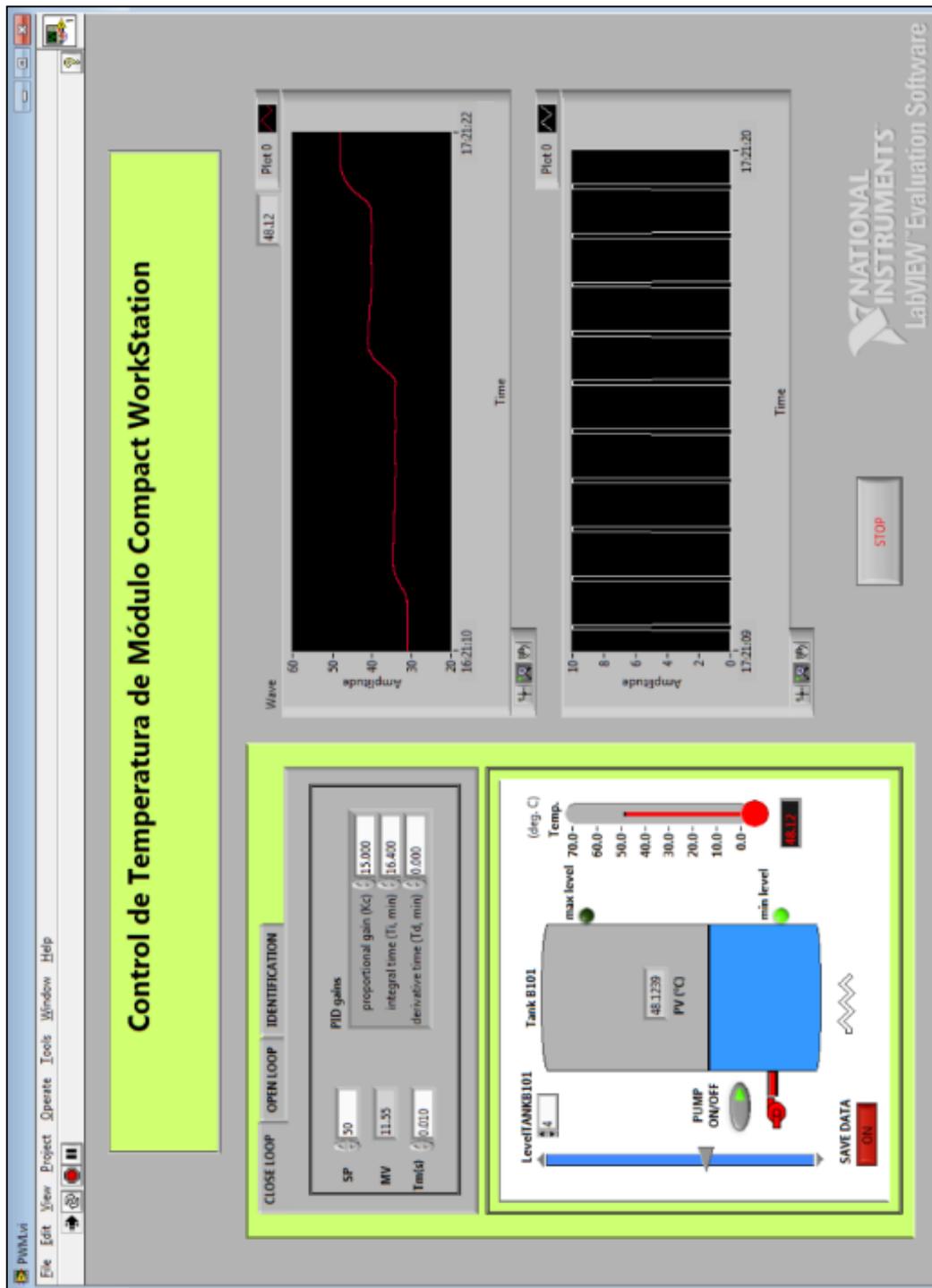


Figura N° 27. Interfaz gráfica para temperatura. Fuente: Elaboración propia

ANEXO 8: Pruebas adicionales en la manipulación de la variable de nivel

En la figura 28 se muestra el sistema con presencia de una perturbación, esta se dio abriendo la válvula V112, originando que haya una fuga del líquido hacia el tanque B0101, de forma que el nivel en el tanque B0102 disminuyó, el controlador detecta este cambio repentino de nivel y actúa, se aprecia en la gráfica que en el momento que ocurre esta perturbación la señal de actuación MV, se eleva hasta 10V, haciendo que rápidamente se restablezca la señal de control PV de manera que llegue a la señal de referencia SP.

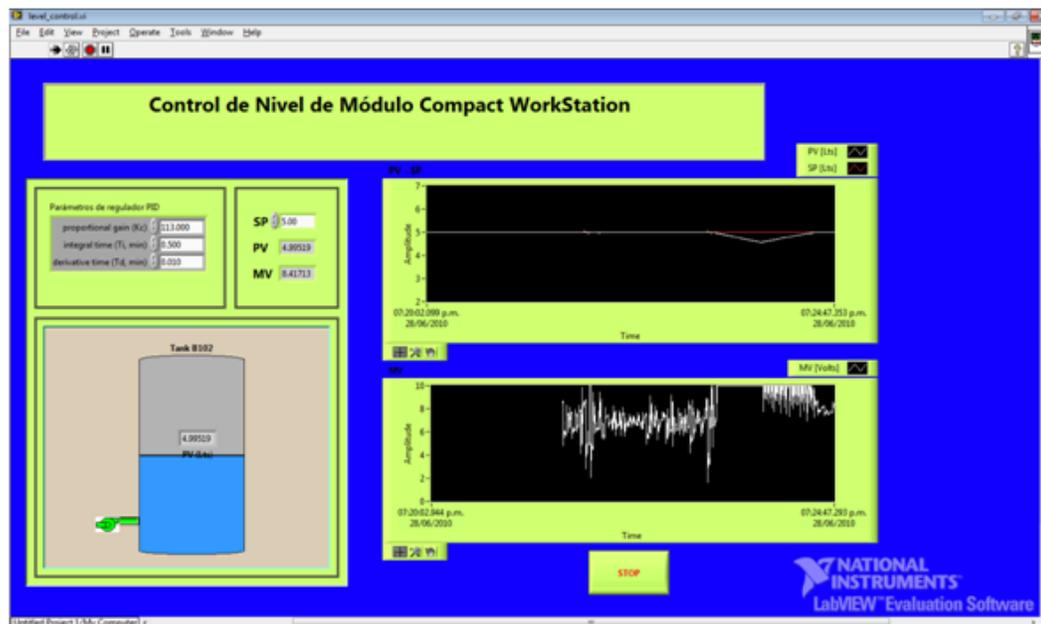


Figura N° 28. Prueba a lazo cerrado con perturbación

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el sistema a lazo cerrado en el control del nivel.

En la figura 29 se aprecia el nivel del líquido en 0.75Lts. El motor de la bomba se encuentra apagado, el sistema está en modo manual.



Fig. N° 29. Tanque a volumen inicial 0.75Lts
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se le dio al sistema una señal de Setpoint de 5 Lts. La bomba es accionada por el controlador haciendo que esta comience a bombear líquido del tanque B0101 hacia el tanque B0102 (figura 30).



Figura N° 30. Llenado de tanque B102
Fuente: Elaboración propia

El nivel comienza a subir, como se aprecia en la figura 31.

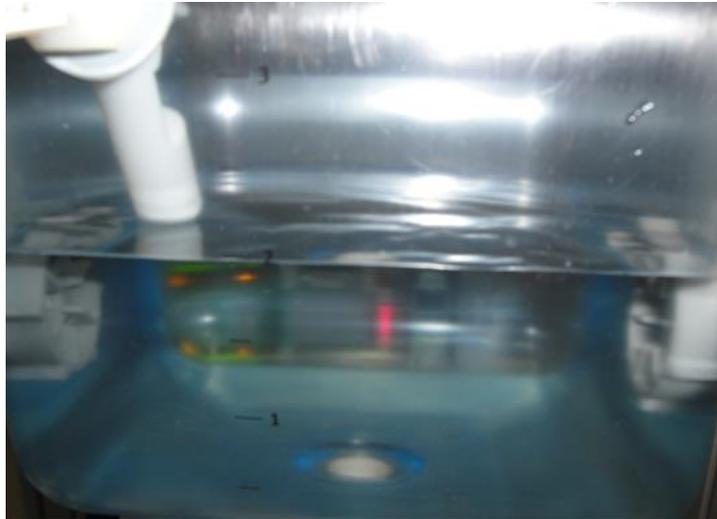


Figura N° 31. Nivel de líquido en tanque
Fuente: Elaboración propia

En el transcurso de 3 minutos el sistema ha llegado al setpoint fijado (figura 32); se puede apreciar en la figura 33 que el nivel se mantiene en su punto de consigna.



Figura N° 32. Nivel de líquido alcanzó el valor de la referencia
Fuente: Elaboración propia

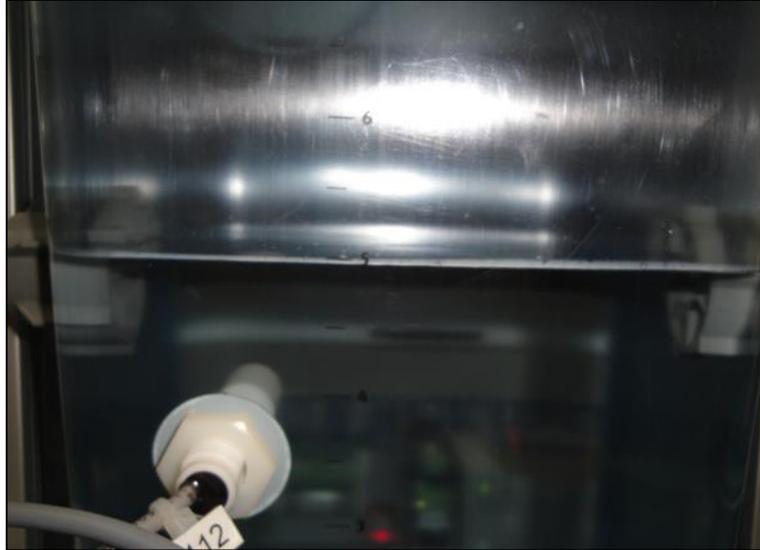


Figura N° 33. Nivel de líquido alcanzó el valor de la referencia
Fuente: Elaboración propia

Ahora se procedió a ingresarle al sistema una perturbación, esta como se dijo anteriormente se procedió a abrir una válvula manteniéndola en ese estado por un tiempo (figura 34).

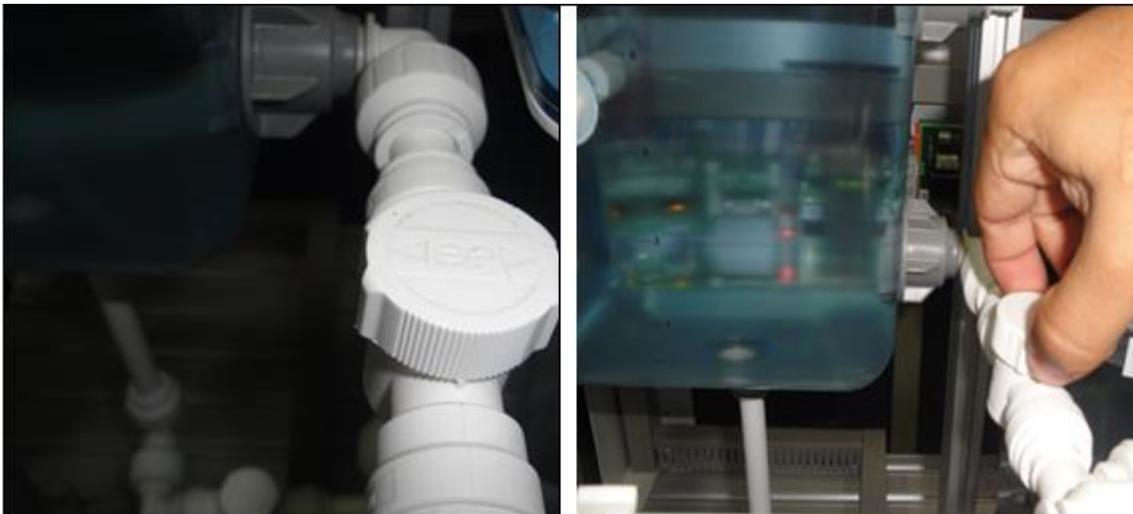


Fig. N° 34. Válvula de salida de líquido
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procedió a hacer un cambio del valor de consigna, se dio un Setpoint de 3Lts (figura 35). En la figura siguiente muestra el comportamiento del

sistema.

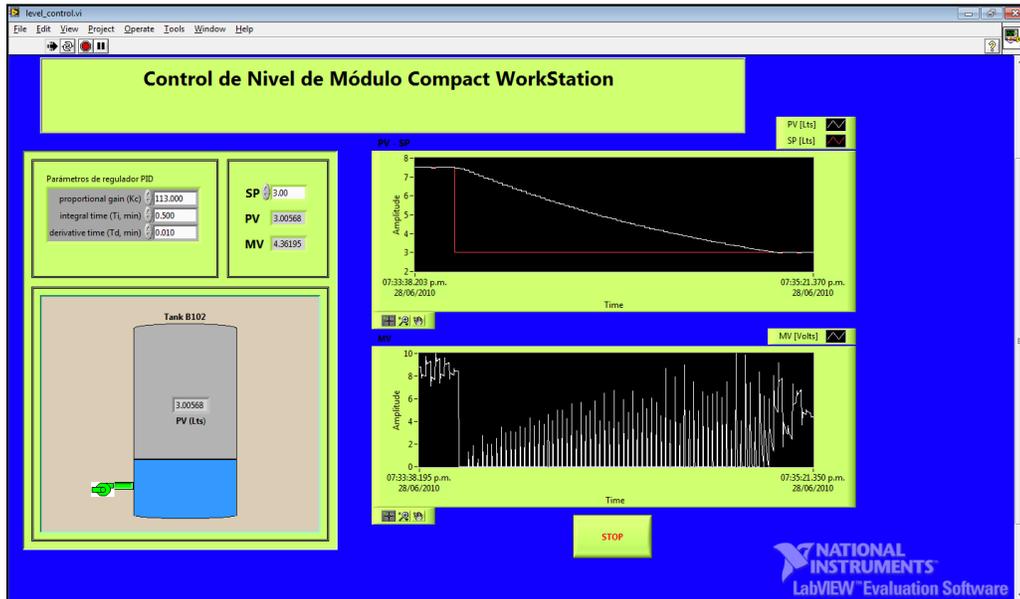


Figura N° 35. Cambio de Setpoint a 3Lts
Fuente: Elaboración propia

En la figura 36 se aprecia el sistema en estado estacionario, como se ve el nivel se encuentra en 3 Lts, el cual es el valor de referencia que se desea llegar.



Figura N° 36. Nivel de líquido alcanzó el valor de Setpoint
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9: Pruebas adicionales en la manipulación de la variable de flujo

A continuación, se aprecia la figura 37 donde inicialmente el sistema ha estado en un caudal de 2 L/m, en estado estacionario, luego se le dio un setpoint de 3 L/m y se aprecia que la variable del proceso comienza a subir hasta alcanzar el valor de consigna.

La señal de color rojo es la variable manipulable MV, la cual es la señal de control de la bomba, mientras que la señal de color verde es la señal de referencia, valor deseado ó setpoint. La señal de color azul es la variable del proceso, la cual se está controlando.

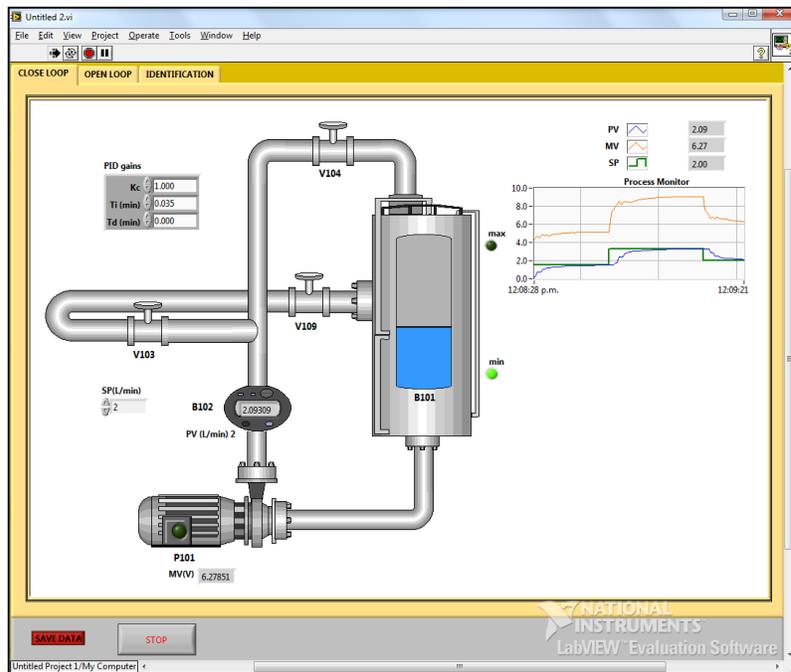


Figura N° 37. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia

En la figura 38 se le da un salto negativo al setpoint, logrando así que la variable del proceso alcance el setpoint sin ningún problema. Se puede apreciar que la señal de control se comporta de forma suave, esto para no generar problemas es el actuador, así como también la disminución de la vida útil de este.

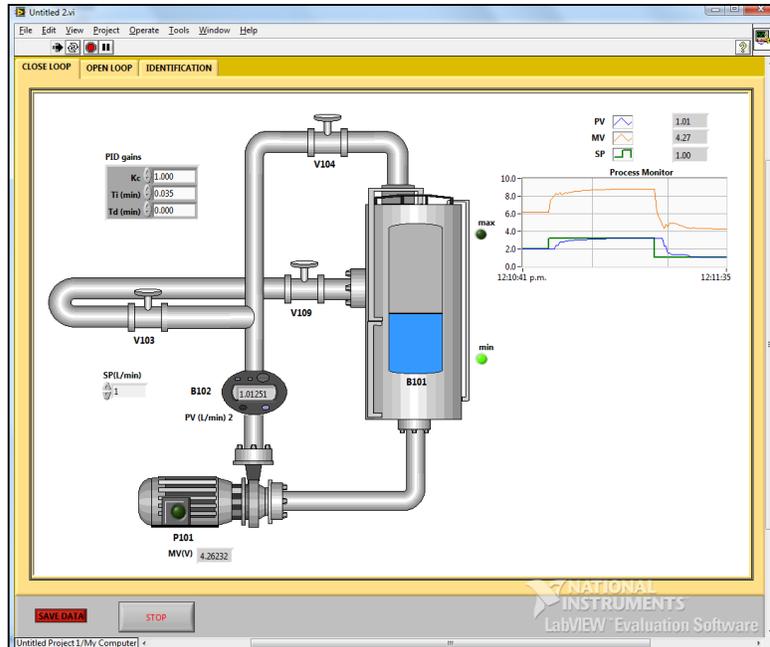


Figura N° 38. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia

En la figura 39 se muestra que se le dio al sistema una perturbación, lo que se hizo es abrir la válvula V104, de manera que el caudal disminuya, como se aprecia el controlador hace que se recupere y alcance el valor de setpoint.

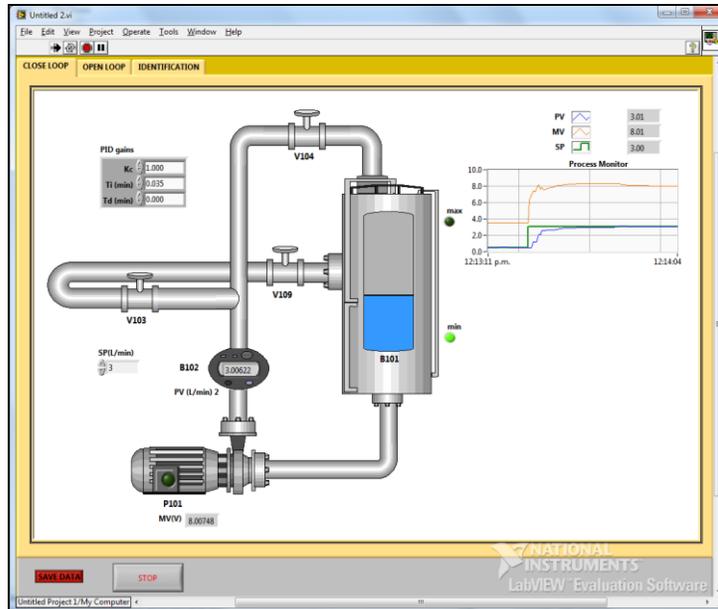


Figura N° 39. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia

La figura 40 muestra al sistema con presencia de perturbación, lo que se hizo es abrir la válvula V104, de manera que el caudal disminuya, como se aprecia el controlador hace que se recupere y alcance el valor de setpoint.

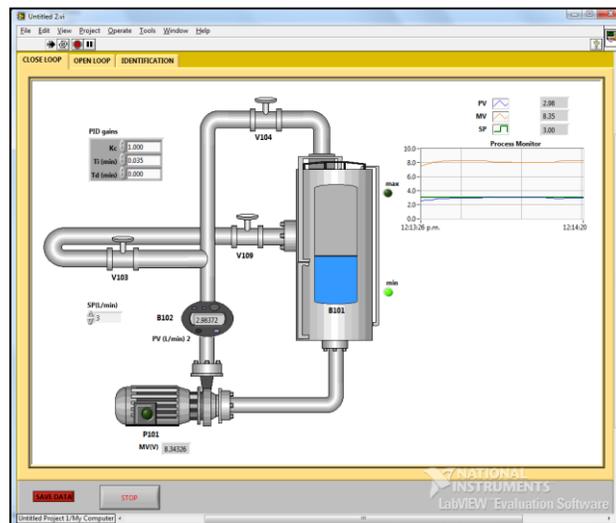


Figura N° 40. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia

La figura 41 muestra al sistema con un setpoint negativo, así como también se le introdujo una perturbación, como se ve, aunque la perturbación se trató de dar en el

estado transitorio del sistema, el controlador logró hacer que se recupere y alcanzar el valor de setpoint.

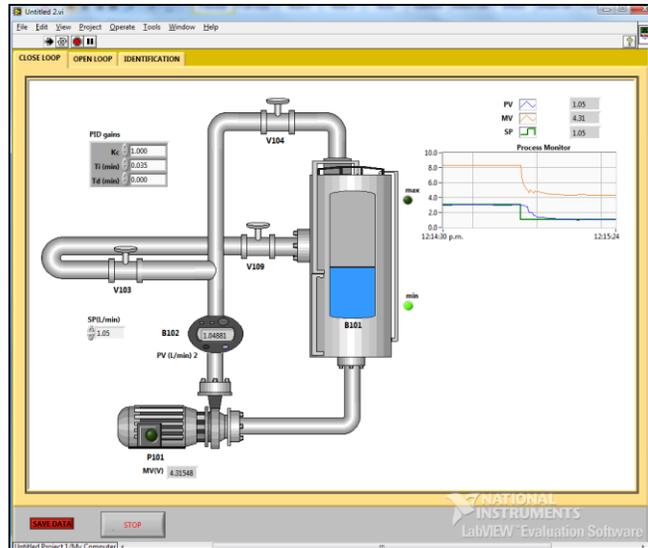


Figura N° 41. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 10: Pruebas adicionales en la manipulación de la variable de temperatura

En la figura 42 se aprecia que inicialmente el sistema ha estado a 30°C, en estado estacionario, luego se le dio un setpoint de 35°C y se aprecia que el sistema ha subido su temperatura hasta este valor de consigna; posteriormente se le dio un cambio de setpoint a 40°C y el sistema responde llegando a alcanzar la temperatura deseada, finalmente se cambió el valor del setpoint a 50°C logrando que la temperatura suba hasta este valor.

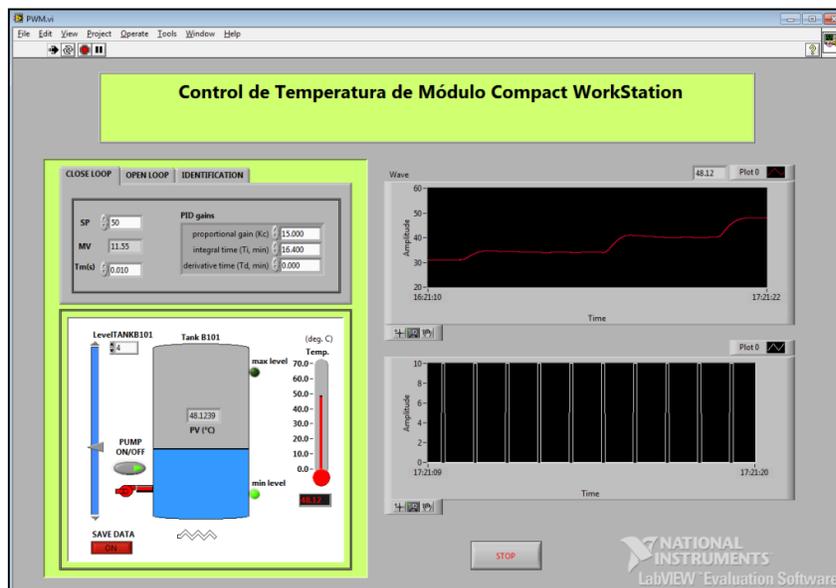


Figura N° 42. Pruebas del sistema a lazo cerrado ante cambios de setpoint
Fuente: Elaboración propia