



Diseño y construcción de un banco interactivo tipo industrial para implementar varias estrategias de control de temperatura mediante un PLC y adquisición de datos mediante ThingSpeak y MySQL

**Juan Diego Alfonso Gaitán
Cristian David Buitrago Beltrán
Wilmer Andrés Medina Claros**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2021

Diseño y construcción de un banco interactivo tipo industrial para implementar varias estrategias de control de temperatura mediante un PLC y adquisición de datos mediante ThingSpeak y MySQL

**Juan Diego Alfonso Gaitán
Cristian David Buitrago Beltrán
Wilmer Andrés Medina Claros**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero en Control y Automatización Industrial

Director (a):
Especialista, José Germán Gutiérrez Rozo

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia

2021

*A mi pareja y compañera de vida, Diana Cante
por todo su apoyo incondicional.*

*Los científicos estudian el mundo tal como es;
los ingenieros crean el mundo que nunca ha
sido.*

Theodore Von Karman

Agradecimientos

A mis padres por haberme inculcado buenos principios, a mi compañera de vida por su apoyo incondicional en mis últimos 10 años de mi vida. A todos los profesores de la universidad Antonio Nariño quienes comparten su conocimiento con entusiasmo para hacer futuros ingenieros. A la empresa Power Quality Solutions de Colombia por haberme apoyado y facilitado mi estudio durante toda mi carrera.

Resumen

La temperatura es una de las variables más utilizadas en la industria, el control de temperatura desde sus principios en 1609 con la incubadora de Drebbel hasta la actualidad, ha sido una de las magnitudes físicas que más presencia tiene en los procesos industriales, desde la industria alimenticia, hasta la petroquímica. El control de temperatura se puede realizar mediante diversos métodos, cada uno de ellos dependiendo de la aplicación final, respuesta y entorno donde se desarrolla.

Teniendo en cuenta la diversidad de métodos utilizados para el control de esta variable y las aplicaciones que se tienen en la industria, nace la necesidad de adoptar medidas y métodos que permitan a los integrantes del proyecto familiarizarse con los dispositivos y controladores más utilizados, para este caso específico se utilizaron estrategias de control a un tanque con capacidad de 50 litros de agua, en el mismo se realizaron los cálculos necesarios para poder obtener los valores deseados y corroborar la funcionalidad del controlador. Del mismo modo se pudo integrar una pantalla HMI y por medio de un PLC se logró realizar la programación necesaria para poder controlar la planta desde el mismo. Adicionalmente y enfatizando la importancia del manejo de la información y datos en tiempo real, se realizó un código para poder obtener los datos del procesos en tiempo real y verificarlos mediante gráficas para, desde cualquier punto con acceso a internet, poder verificar el comportamiento de la planta. Se logró llevar la temperatura del agua contenida en los tanques hasta el valor deseado por medio de la HMI, se pudo tener la información de la temperatura en la plataforma ThingSpeak con un periodo de carga de datos de cada 20 segundos.

Palabras clave: (Controlador, PID, PLC, HMI, adquisición de datos).

Abstract

Temperature is one of the most used variables in the industry, temperature control since his beginins early in 1609 with the Drebbel's Incubator to present, has been a physics magnitude that more pressence has in industry processes, since food industry to petrochemical industry. Temperature control can be done through many methods, each one of them depending of the final aplication, system answer and enviroment when it works.

Taking into account the diversity of methods used to control this variable and the applications that exist in the industry, the need arises to adopt measures and methods that allow each of the members to become familiar with the most used devices and controllers, in order to In this specific case, control strategies were used in a tank with a capacity of 50 liters of water, in which the necessary calculations were made to obtain the desired values and corroborate the functionality of the controller. In the same way, it was possible to integrate an HMI screen and by means of a PLC it was possible to carry out the necessary programming to be able to control the plant from it. Additionally, and emphasizing the importance of managing information and data in real time, a code was created to be able to obtain the process data in real time and verify them using graphs so that, from any point with internet access, to verify the behavior of the plant. It was possible to bring the temperature of the water contained in the tanks to the desired value through the HMI, it was possible to have the temperature information on the ThingSpeak platform with a data loading period of every 20 seconds.

Keywords: Controller, PID, PLC, HMI, data acquisition

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
Objetivos	3
Justificación	5
1 Metodología	7
1.1 Diseño, construcción y adecuación de la planta	9
1.2 Pruebas de funcionamiento y pruebas en lazo abierto	10
1.3 Caracterización, modelamiento y control automático.....	10
1.4 Implementación de controles y adquisición de datos.....	10
2 Marco Teórico	12
2.1 Procesos Térmicos.....	12
2.2 Transferencia de calor.....	12
2.2.1 Transferencia de calor por conducción	13
2.2.2 Transferencia de calor por convección	13
2.2.3 Transferencia de calor por radiación.....	13
2.3 Controlador PID	14
2.3.1 Control Proporcional (P)	15
2.3.2 Controlador Proporcional Integral (PI).....	15
2.3.3 Control Proporcional Derivativo (PD)	15
2.4 Controlador Lógico Programable (PLC).....	16
2.4.1 Clasificación de los PLC	17
2.4.2 Historia de los Controladores PLC.....	18
2.4.3 Componentes de un PLC.....	21
2.5 TIA Portal	25
2.6 Matlab	25
2.7 ThingSpeak de Matlab	25
2.8 MySQL.....	27
3 Desarrollo del proyecto	29

3.1	Construcción de la planta.....	30
3.2	Caracterización de los componentes de la planta	36
3.2.1	Tanque de almacenamiento	37
3.2.2	Resistencia eléctrica sumergible	37
3.2.3	Sensor de temperatura PT100	38
3.2.4	Transmisor de temperatura 4-20 mA.....	39
3.3	Diseño del Control	41
3.3.1	Pruebas en lazo abierto.....	41
3.3.2	Modelamientos matemáticos	44
3.3.3	Valores de Kc, Ti y Td por Ziegler-Nichols.....	52
3.4	Programación del PLC y controladores.....	54
3.5	Programación y diseño de la HMI	58
3.5.1	Pantalla de inicio	59
3.5.2	Pantalla de Overview o visualización de la planta	60
3.5.3	Pantalla Control PID.....	61
3.5.4	Pantalla Control On-Off	62
3.5.5	Pantalla de gráfica de tendencia	63
3.5.6	Pantalla de diagnóstico	64
3.6	Migración de datos a ThingSpeak.....	65
3.7	Almacenamiento de datos en MySQL.....	68
4	Resultados	71
5	Conclusiones y recomendaciones	73
5.1	Conclusiones	73
5.2	Recomendaciones	75
A.	Anexo: Hoja de datos PLC Siemens S7-1200.....	77
B.	Anexo: Hoja de datos HMI Siemens KTP600 Basic mono PN.....	78
C.	Anexo C: Hoja de datos detector de temperatura PT100	79
D.	Anexo D: Hoja de datos electrobomba I Water QB60.....	80
E.	Anexo E: Código almacenamiento datos ThingSpeak	81
F.	Anexo F: Diseños de Control PI - PID.....	82
G.	Anexo G: Archivo Excel pruebas Extech	88
H.	Anexo H: Manual de uso de la planta	89
I.	Anexo I: Evidencias construcción y funcionamiento de proyecto	93
J.	Anexo J: Base de datos en MySQL Workbench	97
K.	Programa del PLC.....	103
L.	Programa del HMI	104

M. Planos de conexiones del PLC.....	105
N. Planos de construcción de planta.....	106
6 Bibliografía	107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Diagrama de flujo desarrollo TIG.....	7
Figura 1-2 Disposición de la planta	9
Figura 2-1 Esquema Control PID	14
Figura 3-1 Disposición de la planta construida	29
Figura 3-2 Tanques cilíndricos de la planta	30
Figura 3-3 Tablero de control en fase de construcción	31
Figura 3-4 Resistencia eléctrica 5 kW	32
Figura 3-5 Electrobomba de la planta.....	33
Figura 3-6 PLC Siemens S7-1200.....	34
Figura 3-7 HMI Siemens KTP600 Basic Mono PN	35
Figura 3-8 Relé de estado sólido de 100 A.....	36
Figura 3-9 Transmisor PT100.....	39
Figura 3-10 Conexión PLC + Transmisor + Resistencia	40
Figura 3-11 Prueba No. 1 en lazo abierto.....	42
Figura 3-12 Prueba No. 2 en lazo abierto.....	43
Figura 3-13 Termómetro digital Extech SDL200.....	44
Figura 3-14 Primero 10 datos del termómetro Extech	46
Figura 3-15 Gráfica de datos importados en Matlab	47
Figura 3-16 Importe de datos en Matlab.....	47
Figura 3-17 Ventana System Identification de Matlab.....	48
Figura 3-18 Respuesta a FT generada por System Identification	49
Figura 3-19 Menú Plant Identification	50
Figura 3-20 Respuesta a entrada escalón de TF2.....	51
Figura 3-21 Reglas de sintonía de Ziegler Nichols a entrada escalón	52
Figura 3-22 Respuesta a entrada escalón a TFG.....	53

Figura 3-23 Esquema de conexiones PLC.....	54
Figura 3-24 Bloque Main del TIA Portal	55
Figura 3-25 Flujograma Control PLC	56
Figura 3-26 Flujograma Control PLC (Continuación)	57
Figura 3-27 Pantalla de inicio HMI	59
Figura 3-28 Pantalla de visualización de la planta	60
Figura 3-29 Pantalla control PID	61
Figura 3-30 Pantalla Control On-Off	63
Figura 3-31 Pantalla de gráfica de tendencia.....	64
Figura 3-32 Pantalla de diagnóstico.....	65
Figura 3-33 Módulo NodeMCU ESP8266	66
Figura 3-34 Interfaz de ThingSpeak.....	67
Figura 3-35 Procedimiento Exportar datos de ThingSpeak	68
Figura 3-36 Código de creación base de datos MySQL.....	69
Figura 3-37 Configuración de importe de datos a MySQL	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1 Características resistencia eléctrica.....	32
Tabla 3-2 Características técnicas electrobomba	33
Tabla 3-3 Tabla de datos PT100	38
Tabla 3-4 Respuesta transmisor	40

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
V	Voltaje	Voltio	$I * R$
P	Potencia	Watt	$I * V$
I	Corriente	Ampere	V/R
R	Resistencia	Ohmio	V/I
E	Energía	Julio	$E * t$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Ω	Resistencia eléctrica	Ohmio	V/R

Abreviaturas

Abreviatura	Término
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
PVC	Polyvinyl chloride (Cloruro de Polivinilo)
HP	Horse Power (Caballo de fuerza)
PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human-Machine Interfaz (Interfáz hombre-máquina)

Abreviatura Término

<i>VAC</i>	Voltaje en Corriente Alterna
<i>VDC</i>	Voltaje en Corriente Directa
<i>AWG</i>	American Wire Gauge
<i>TF</i>	Transfer Function (Función de transferencia)

Introducción

Múltiples métodos de control se encuentran en la industria actualmente para una de las variables ampliamente utilizadas como lo es la temperatura, su importancia se debe a que con la manipulación de esta magnitud física se pueden realizar diversos procesos e incluso afectar el estado de otras variables como el volumen o presión de un recipiente. Por este motivo es necesario en un control de temperatura tener siempre el valor deseado de la magnitud para que no afecte otros procesos.

El control de temperatura puede implementarse mediante diversos métodos, siendo el control On-Off uno de los más comunes para este tipo de variable debido a su simplicidad y ajuste a los valores deseados, sin embargo, para aplicaciones con más precisión a los set point establecidos, resulta más conveniente el control PID. El control PID es uno de los métodos de control más comunes, sencillos y fiables presente en la industria, se destaca por su fácil programación, buena respuesta a perturbaciones y error mínimo a los valores deseados. En la actualidad se consiguen para diferentes aplicaciones y con parámetros de sintonización bastante simples, sin embargo, la ingeniería de control que se encuentra detrás de este tipo de controladores es bastante considerable. En este proyecto se emplean los dos tipos de control mencionados para verificar las respuestas de cada uno.

Se busca poder llevar la temperatura de un tanque con agua hasta los valores deseados por quien manipule la planta construida, adicionalmente poder tener una verificación del valor de la variable a controlar en tiempo real mediante el internet de las cosas. Para llevar a cabo del mismo se realizó la construcción a escala de una planta compuesta por dos

tanques de almacenamiento del líquido, tubería de PVC que interconecta los tanques con una electrobomba de $\frac{1}{2}$ caballo de fuerza y un tablero de control con las conexiones necesarias para realizar el control y supervisión del proceso. Para poder realizar el control es necesario tener bases fundamentales en sistemas dinámicos, termodinámica y teoría de control para poder caracterizar cada uno de los componentes que intervienen en la planta y manejo de lenguajes de programación para configurar el PLC, el dispositivo de transmisión de datos vía WiFi y la obtención de datos en MySQL.

Con los métodos utilizados en el desarrollo del proyecto se logró verificar y comprobar el correcto funcionamiento de los controladores, los tiempos de respuesta y el comportamiento de la planta en general, de igual manera se pudo obtener información de los datos de la temperatura de la planta en una plataforma de internet de las cosas.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un banco interactivo de pruebas para realizar control ON-OFF y caracterizar, sintonizar e implementar un control P, I, PI y PID para temperatura de agua en un tanque de 50 litros mediante un PLC y realizar la supervisión y control por medio de un HMI, la plataforma ThingSpeak y almacenamiento de datos en MySQL.

Objetivos específicos

- Caracterizar los componentes y actuadores de la planta.
- Modelar matemáticamente y simular cada uno de los procesos y lazos de control de la planta.
- Diseñar la planta donde se realizará el control teniendo en cuenta, el controlador, los actuadores y los sensores.

4 Diseño y construcción de un banco interactivo tipo industrial para implementar varias estrategias de control de temperatura mediante un PLC y adquisición de datos mediante ThingSpeak y MySQL

- Implementar y poner en funcionamiento el proceso de la planta en modo manual y automático.
- Monitorear el funcionamiento de la planta mediante el HMI.
- Realizar el desarrollo para la adquisición de datos por parte de los sensores y ThingSpeak.
- Diseñar la base de datos en MySQL.
- Elaborar el manual de operación segura de la planta

Justificación

El control PID es uno de los controladores más utilizados en la industria por los ingenieros a diario alrededor del mundo. Por este motivo es necesario que el futuro profesional tenga unas bases y conocimientos sólidos en caracterizar, configurar y sintonizar un controlador PID. Dado que, como fue mencionado en el planteamiento del problema, actualmente no se cuenta con los recursos para poder realizar un control más robusto y cercano a los procesos presentes en la industria, se espera que el proyecto permita al estudiante interactuar de manera eficaz y segura con una planta determinada y el control de sus variables. (Åström & Hägglund, 1995)

Este proyecto consiste en la construcción de un banco de pruebas de un prototipo de planta industrial, el cual involucra una de las variables a controlar más utilizadas en la industria como lo es la temperatura. Para esto los estudiantes podrán caracterizar el sistema mediante los actuadores de manera manual, tomar las medidas necesarias para encontrar las respuestas del sistema, las funciones de transferencia de toda la planta, realizar control ON-OFF y hacer comparaciones con un control PID, permitiendo analizar, evaluar y reforzar los conocimientos adquiridos por los estudiantes. La planta contará con modo manual-automático, tendrá la opción de crear perturbaciones para verificar la respuesta y control del mismo.

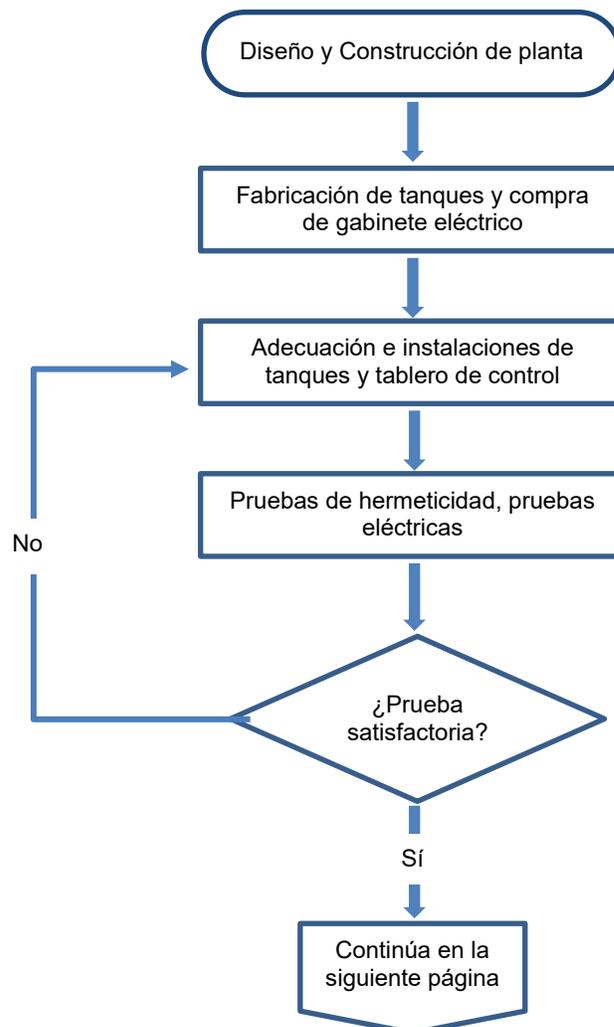
Los sistemas de supervisión y control hacen parte de las ventajas de la Automatización, por ejemplo, los sistemas SCADA y HMI son sistemas que obtienen información de procesos remotos y actúan directamente sobre éste de manera local. Se espera poder implementar un sistema de supervisión y control que permita monitorear y controlar el proceso, esto se realizará desde la plataforma ThingSpeak y los datos se almacenaran en MySQL, del mismo modo se podrá visualizar el proceso de manera local mediante un HMI (Gutierrez & Iturralde, 2017).

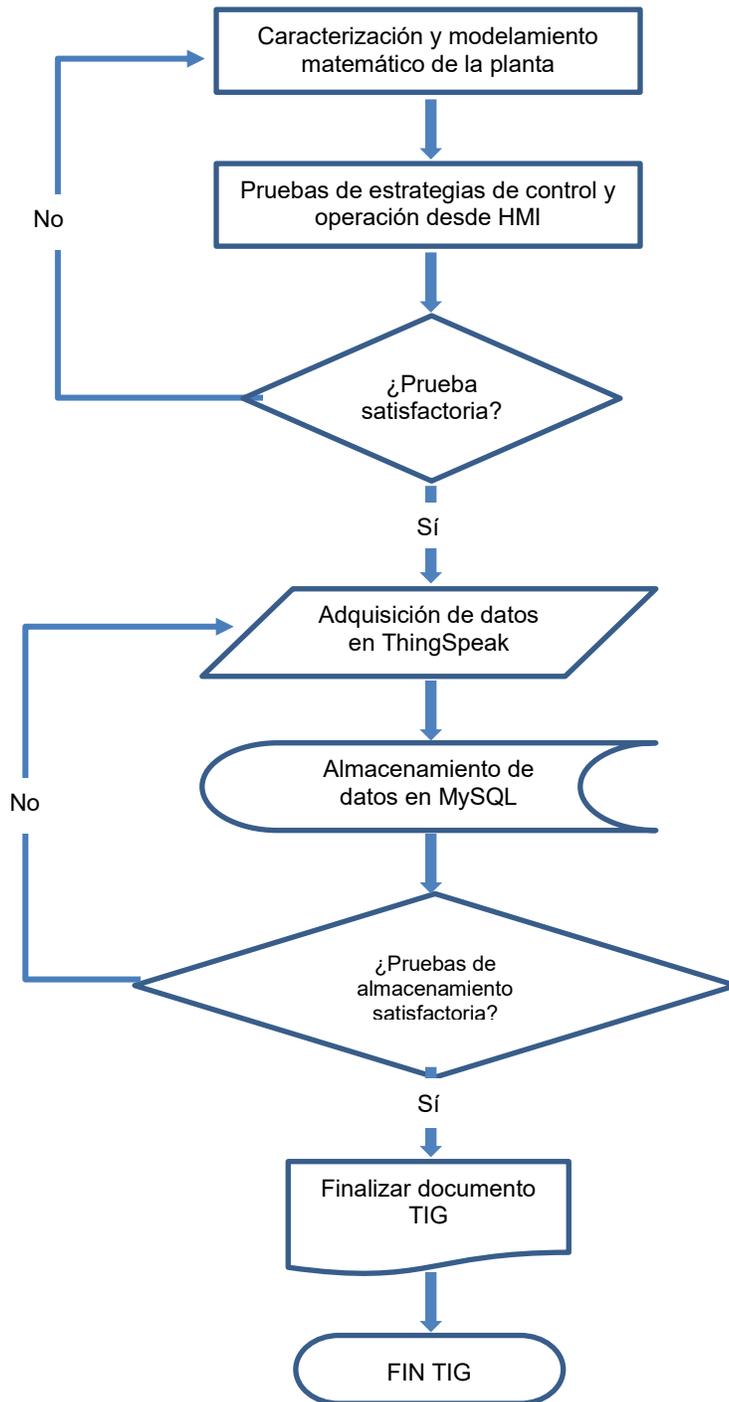
Debido a que ya no se puede contar con los PLC de la Universidad por la contingencia nacional, para la realización del proyecto es necesario la adquisición de un PLC que permita parametrizar las condiciones de la planta y el respectivo software para su programación

1 Metodología

El paso a paso para el desarrollo del proyecto se describe en la **Figura 1-1**, seguidamente se explica de manera superficial cada uno de los pasos para la realización del proyecto. En el capítulo 3 se describe a profundidad la metodología utilizada.

Figura 1-1 Diagrama de flujo desarrollo TIG



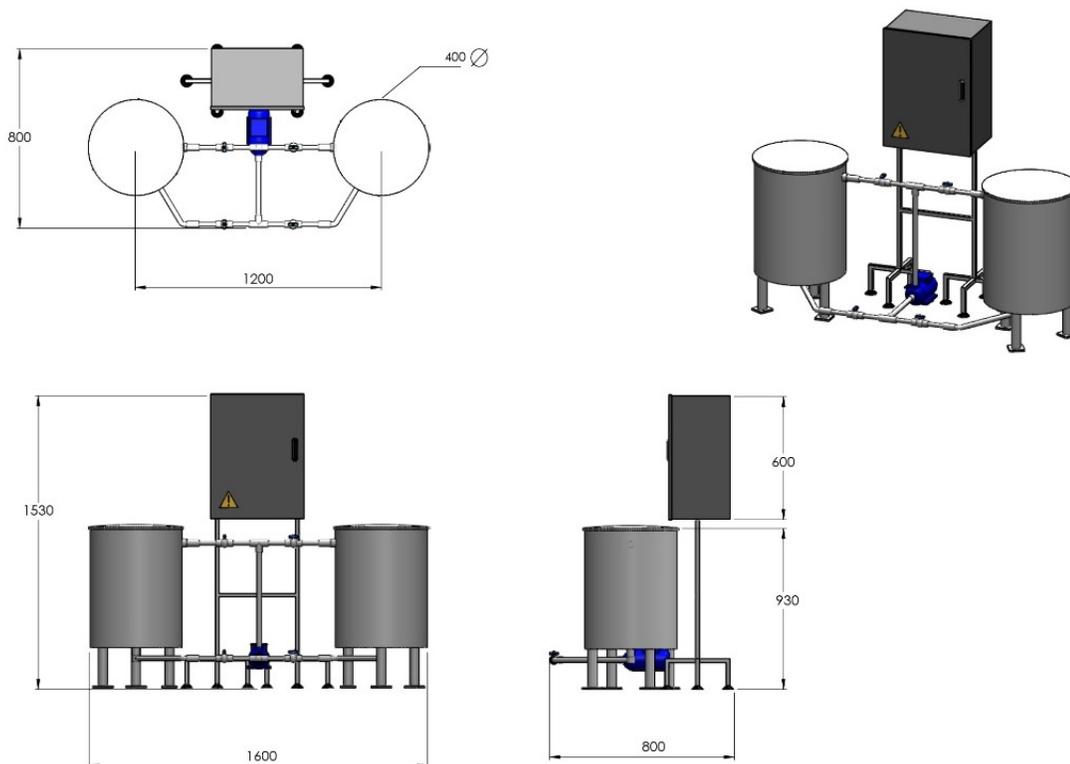


Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso.

1.1 Diseño, construcción y adecuación de la planta

Para poder iniciar con el desarrollo del proyecto se mandaron a fabricar dos tanques cilíndricos de 40 cm de diámetro y una altura de 60 cm en lámina coll roll y recubierto con pintura electrostática para evitar la corrosión causada por el agua, al mismo tiempo se realizó la compra de un cofre eléctrico certificado por el RETIE para realizar las conexiones eléctricas de control y potencia, una vez se tuvieron los tanques, se realizaron las conexiones en tubería de PVC junto con una electrobomba de ½ HP para recircular el fluido y tener una temperatura lo más homogénea posible dentro de todo el tanque a controlar. La figura **Figura 1-2** muestra la disposición de los elementos principales de la planta.

Figura 1-2 Disposición de la planta



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso.

1.2 Pruebas de funcionamiento y pruebas en lazo abierto

Teniendo la planta construida y todas las conexiones realizadas, se continuó con las pruebas de hermeticidad de los tanques, tuberías y electrobomba para verificar que no se tenían fugas ni filtraciones en la planta, del mismo modo se comprobaron las conexiones eléctricas de potencia y control, todas las conexiones eléctricas se realizaron con borneras y cada dispositivo cuenta con un breaker de protección en caso de sobrecarga y/o cortocircuito. Del mismo modo se comenzaron a realizar las pruebas de funcionamiento y comunicación del controlador PLC y del HMI.

1.3 Caracterización, modelamiento y control automático

Para poder realizar la caracterización y el modelamiento del sistema, es necesario primero poner a calentar el agua del tanque para poder ver el comportamiento de la curva de calentamiento del agua y con esta poder establecer el tiempo de respuesta transitoria y el tiempo de establecimiento del sistema, esta curva se debe obtener graficando la temperatura en función del tiempo, una vez se haya obtenido la gráfica se podría comenzar a realizar el modelamiento matemático de la planta y los cálculos necesarios para obtener las constantes de proporcionalidad, de integración y el tiempo derivativo para poder sintonizar el controlador PID.

1.4 Implementación de controles y adquisición de datos

Después de haber caracterizado la planta y las respuestas del sistema, haber calculado los valores para la sintonización del controlador y haber realizado las pruebas, se implementaron los diferentes tipos de control y se realizaron las comparaciones de respuestas y valores deseados para evaluar el comportamiento de cada estrategia de control, se realizaron los ajustes para poder empezar a tener adquisición de datos mediante ThingSpeak y comprobar la comunicación del mismo con la planta.

Al mismo tiempo se realiza el código necesario de programación para poder tener el almacenamiento de datos mediante MySQL y poder obtener los mismos en tiempo real desde cualquier punto con acceso a internet.

2 Marco Teórico

2.1 Procesos Térmicos

Los procesos térmicos en la física y específicamente en la industria tienen sus bases en los procesos termodinámicos, la transferencia de calor producto de una generación de energía es la manera más usual en la que se presentan estos procesos, uno de los ejemplos más claros de generación de calor es el efecto o ley de Joule, la cual dice que la cantidad calor generado se da gracias la relación que existe entre la cantidad de corriente que pasa por una resistencia y su valor óhmico y el tiempo que esta fluye a través de la misma.

2.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor entre dos o más cuerpos o entre un cuerpo y el medio que lo rodea, se da por la diferencia de temperaturas o de cantidad de energía calorífica que uno de los cuerpos conserva. Es decir, se produce un flujo de energía en forma de calor del cuerpo o medio que tiene más temperatura hacia el que menos tiene, este fenómeno varía según las características físicas de los cuerpos en relación, existen elementos con capacidades caloríficas más altas que otras comúnmente llamadas conductores o aislantes, estas propiedades inciden directamente en la velocidad de la transferencia de calor de los cuerpos y también dependen del método por el cual se transfieren, otro factor importante en la transferencia es el área de contacto o incidencia de la transferencia de

calor, la unidad utilizada para las propiedades de transferencia de calor es el Joule o Julio (J). Existen tres métodos por los cuales se genera la transferencia de calor: conducción, convección y radiación. (Fisic, s.f.)

2.2.1 Transferencia de calor por conducción

La energía o calor se transfiere a nivel atómico, es decir, la energía cinética de las zonas más calientes transfieren su energía a los átomos con menor temperatura, la transferencia es netamente de energía y no se transfiere materia entre los cuerpos. La cantidad de calor que se transfiere entre los cuerpos se puede determinar mediante la ley de Fourier.

2.2.2 Transferencia de calor por convección

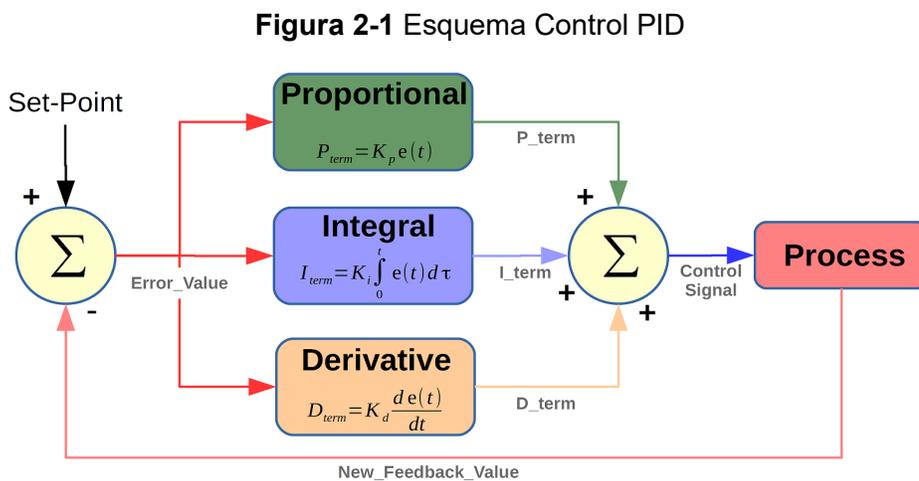
Este tipo de transferencia se presenta en los fluidos líquidos o gaseosos, se produce un movimiento de energía de las partículas del fluido las cuales hacen circular las otras ocupando su lugar y desplazando la parte “fría” a otras áreas con diferente temperatura, se puede resumir como la transferencia de calor debido al movimiento de un fluido. La ley de enfriamiento de Newton estudia y explica este fenómeno.

2.2.3 Transferencia de calor por radiación

La principal característica de este tipo de transferencia es la ausencia de contacto físico con las partes involucradas, también se puede dar en ausencia de un medio físico, es decir que puede haber transferencia de calor en el vacío. Se debe a que la forma de propagación del calor se realiza por medio de ondas electromagnéticas. La ley que sustenta este tipo de radiación es la ley de Stefan-Boltzman. (Young & Freedman, 2009)

2.3 Controlador PID

El controlador PID, o simplemente PID, es una técnica de control de procesos que une las acciones derivada, integradora y proporcional, provocando que la señal de error sea minimizada por la acción proporcional, puesta a cero por la acción integral y obtenida con un velocidad anticipatoria por acción derivada. El esquema general de un control PID se puede observar en la **Figura 2-1**.



Fuente: <https://microcontrollerslab.com/pid-controller-implementation-using-arduino/>

Para realizar el modelamiento del proceso, es necesario obtener la curva o comportamiento del sistema en lazo abierto para poder determinar el tiempo de establecimiento y mediante estos datos poder determinar la función de transferencia en lazo abierto. Después de realizar el modelamiento del comportamiento y proceso, es posible realizar los cálculos necesarios para aplicar el control dependiendo de las características que se deseen tener en la respuesta de la planta.

Los sistemas de control de lazo abierto son aquellos en los que la señal de salida no ejerce ninguna acción de control sobre el sistema, donde la señal de salida no se mide ni se utiliza

para la retroalimentación del sistema para comparar con la entrada. (Ruano Ruano, Gámez García, & Gómez Ortega, 2016)

2.3.1 Control Proporcional (P)

El control proporcional se aplica típicamente a muchos procesos que contienen constantes de tiempo simples y responde rápidamente tanto a las perturbaciones como a los cambios del punto de ajuste. Sin embargo, tiene la característica normalmente indeseable de presentar un error residual en régimen permanente (compensación). La afinación es relativamente fácil de lograr ajustando un solo parámetro (K_p) (Zayas-Gato, Quitian, Jove, Casteleiro-Roca, & Calvo-Rolle, 2020)

2.3.2 Controlador Proporcional Integral (PI)

La principal característica del control integral es la reducción o eliminación de errores de forma permanente. Tiene la desventaja de hacer que la respuesta sea muy oscilante cuando la ganancia integral es muy alta o la resolución del sensor es baja, este inconveniente se supera con la adición de la ganancia proporcional y si es necesario la atenuación de la ganancia integral.

2.3.3 Control Proporcional Derivativo (PD)

Un controlador derivado asociado a la acción proporcional, corresponde a la adición de un cero al sistema, actuando beneficiosamente en el régimen de transición, tendiendo a incrementar la estabilidad relativa del sistema y reduciendo el tiempo de acomodación, sin embargo, contrarrestando estas ventajas, aumenta el tiempo de subida y, al no actuar en régimen permanente, no corrige el error de estado estacionario.

2.4 Controlador Lógico Programable (PLC)

Controlador Lógico Programable (acrónimo PLC, en inglés: Programmable Logic Controller - PLC) es una computadora especializada que realiza funciones de automatización, control y monitoreo de máquinas, actuadores, sensores y procesos industriales de diversos tipos y niveles de complejidad a través de un software específico desarrollado por la fabricante del PLC y programado mediante cualquiera de los lenguajes de programación disponibles (cada tipo de controlador tiene su propio software) (Fonseca Jaramillo & LlumiQuinga Quiguango, 2018)

El Controlador Lógico Programable es un equipo electrónico digital con hardware y software compatible con aplicaciones industriales. Por tanto, es un dispositivo electrónico digital que utiliza memoria programable para almacenar internamente instrucciones e implementar funciones específicas, como lógica, secuenciación, temporización, conteo y aritmética, control, a través de módulos de entradas y salidas, a varios tipos de máquinas y/o procesos.

El controlador cuenta con un sistema operativo en tiempo real para controlar procesos de alto riesgo, común en industrias y hardware que debe soportar condiciones extremas de temperatura, humedad, cambios de presión, entre otras situaciones que una computadora estándar no soportaría. (Cano Padrón, Cárdenas Carballo, Aparicio Marroquín, López Molina, & Santos Hernandez, 2018)

Un PLC es el controlador indicado para lidiar con sistemas caracterizados por eventos discretos (SEDs), es decir, con procesos en los que las variables asumen valores cero o uno (o las llamadas variables digitales, es decir, que solo asumen valores dentro de un conjunto finito). También pueden manejar variables analógicas definidas por rangos de valores de corriente o voltaje. Las entradas y/o salidas digitales son los elementos discretos, las entradas y/o salidas analógicas son los elementos variables, basados en valores conocidos de tensión o corriente.

En el área de control de procesos, la aplicación se da en industrias de tipo continuo, que producen líquidos, materiales gaseosos y otros productos. En el caso de la automatización industrial, la aplicación se produce en las áreas de producción en líneas de montaje, por ejemplo, en la industria del automóvil. En un sistema típico, toda la información de los sensores se concentra en el controlador (PLC) que, de acuerdo con el programa en la memoria, define el estado de los puntos de salida conectados a los actuadores. (Luzón Calderón & Quinchiguango De La Cruz, 2018)

Los PLC son capaces de comunicar datos a través de canales seriales. Con esto pueden ser supervisados por computadoras que forman sistemas de control integrados. El software de supervisión controla las redes de controladores lógicos programables. Cuenta con canales de comunicación en los que es posible conectar los PLC a la interfaz de operador (HMI), ordenadores, otros PLC e incluso con unidades de entrada y salida remotas. Cada fabricante establece un protocolo para hacer que sus equipos intercambien información entre sí. Los protocolos más comunes son Modbus (Modicon - Schneider Electric), EtherCAT (Beckhoff), Profibus (Siemens), Unitelway (Telemecanique - Schneider Electric), DeviceNet(Allen Bradley) RAPIEnet (LSis - LGis), PROFINET (Siemens y Phoenix Contact) entre muchos otros.

Las redes de campo abierto como MODBUS-RTU, PROFIBUS y el último PROFINET son de uso común con los PLC que permiten aplicaciones complejas en la industria automotriz, del acero, de la pulpa y del papel, entre otras. (Cibrian Anaya, Luque Vega, & López Neri, 2019)

2.4.1 Clasificación de los PLC

Generalmente, las familias de controladores lógicos programables se definen por: capacidad de procesamiento; número de puntos de entrada y/o salida (E/S); tipo de control; tamaño, en formato compacto, donde todos los puntos de entrada y salida están juntos en la misma unidad, y modular, donde los puntos de entrada y salida se pueden conectar y

desconectar para cambiar la estructura y controlar otro proceso; entre otras categorías. Entre los principales beneficios y ventajas de un PLC se puede mencionar:

- Reducción de costes: debido a la gran cantidad de relés y la necesidad de mantenimiento, los PLC se convierten en una opción más viable.
- Inmunidad al ruido electromagnético: el PLC dispone de un sistema de aislamiento frente al ruido eléctrico.
- Fácilmente configurable: con racks modulares, es posible cambiar los módulos de entradas y salidas según una necesidad específica.
- Fácilmente programable: los lenguajes utilizados, por ejemplo) son fáciles de aprender y utilizar, facilitando la construcción de la lógica de control. Además de esta facilidad, los lenguajes permiten realizar operaciones más complejas que las realizadas mediante relés.
- Gran flexibilidad: debido a los lenguajes utilizados es más fácil modificar la lógica del proceso.
- Mayor control: al ser un equipo microprocesador, facilita al usuario la interacción con el hardware a través del software, lo que hace que la localización de averías sea muy práctica y sencilla.
- Monitorización online: se pueden tener varios controladores conectados manteniendo la comunicación, y a través de esta conexión se puede monitorizar los procesos en tiempo real.
- Mantenimiento sencillo: a menudo el propio PLC indica errores, como la ausencia de una señal de entrada, por ejemplo.
- Funciones para procesamiento en tiempo real y multitarea: el control en tiempo real permite una precisión mucho mayor en la ejecución de las tareas. (Garcés Mendoza & Torres Romero, 1999)

2.4.2 Historia de los Controladores PLC

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) fueron desarrollados en la década de 1960 en Estados Unidos, con el propósito de reemplazar los paneles de relés que eran ampliamente utilizados en la industria automotriz para ejecutar controles basados en lógica

combinacional y secuencial. Al ser electromecánicos, los relés que se utilizaban en los dispositivos de control tenían varios inconvenientes como problemas en los contactos, desgaste por contacto repetitivo, dificultad para modificar la lógica de control y necesidad de mantenimiento periódico.

El fabricante de automóviles estadounidense GM (General Motors) tuvo dificultades para actualizar sus sistemas de ensamblaje automático, porque cada vez que los técnicos cambiaban un modelo de automóvil o un método de producción, los técnicos pasaban horas e incluso semanas haciendo cambios en los paneles de control, cambiar cableado e instalar más relés, algo que trajo gran inactividad y baja productividad a la empresa. Ante estos y otros inconvenientes y con la evolución de los procesadores, GM desarrolló el primer proyecto de PLC para automatizar eficientemente los procesos en su línea de montaje. (Garcés Mendoza & Torres Romero, 1999)

A partir de este momento, varias otras industrias adoptaron PLC en sus líneas de producción y en los años siguientes, con la aceleración de las tecnologías electrónicas, los controladores lógicos programables se generalizaron cada vez más.

La idea inicial del PLC era un dispositivo con las siguientes características resumidas:

- Facilidad de programación;
- Facilidad de mantenimiento con concepto de complemento;
- Alta confiabilidad;
- Dimensiones más pequeñas que los paneles de relés, para reducción de costos
- Precio competitivo;
- Ampliación en módulos;
- Mínimo de 4000 palabras en memoria.

Se pueden dividir didácticamente los PLC históricamente según el sistema de programación que utilice en cinco generaciones principales:

1ª Generación: Los PLC de primera generación se caracterizan por una programación estrechamente vinculada al hardware del equipo. El lenguaje utilizado fue el ensamblador que variaba según el procesador utilizado en el proyecto del PLC, es decir, para poder programar era necesario conocer la electrónica del proyecto del PLC. Así, la tarea de programación fue desarrollada por un equipo técnico altamente calificado, registrando el programa en la memoria EPROM, realizándose normalmente en el laboratorio junto con la construcción del PLC.

2da Generación: Aparecen los primeros “Lenguajes de Programación” , no tan dependientes del hardware del equipo, posibilitados por la inclusión de un “Programa Monitor” en el PLC, que convierte (en jerga técnica, “compila”) las instrucciones del programa, verifica el estado de las entradas, se compara con las instrucciones del programa de usuario y cambia los estados de las salidas. Los terminales de programación (o casos, como se los conocía) eran en realidad programadores de memoria EPROM. Las memorias luego de ser programadas se colocaron en el PLC para que se pudiera ejecutar el programa del usuario.

3ª Generación: Los PLC's ahora cuentan con una Entrada de Programación, donde se conecta un Teclado o Programador Portátil, pudiendo cambiar, borrar, grabar el programa del usuario, además de realizar pruebas (Debug) en el equipo y el programa. La estructura física también cambia, con tendencia a Sistemas Modulares con Racks o Rangos.

4ª Generación: Con la popularización y la disminución del precio de las microcomputadoras (generalmente clones de la PC IBM), los PLC empezaron a incluir una entrada para la comunicación serie. Con la ayuda de microcomputadoras, la tarea de programación comenzó a realizarse en ellas. Las ventajas fueron el uso de diversas representaciones de los lenguajes, la posibilidad de simulaciones y pruebas, entrenamiento y ayuda del software de programación, la posibilidad de almacenar varios programas en la computadora, etc.

5ta Generación : Actualmente, existe una preocupación por estandarizar los protocolos de comunicación de los PLC, con el fin de proporcionar que los equipos de un fabricante “hablen” con los equipos de otro fabricante, no solo los PLC, tales como Controladores de Procesos , Sistemas de Supervisión , Redes Internas de Comunicación, etc., proporcionando integración para facilitar la automatización, gestión y desarrollo de plantas industriales más flexibles y estandarizadas, fruto de la denominada Globalización. Existen Fundamentos Mundiales para establecer estándares y protocolos de comunicación. La gran dificultad ha sido una estandarización por parte de los fabricantes. (Luzón Calderón & Quinchiguango De La Cruz, 2018)

2.4.3 Componentes de un PLC

Los controladores lógicos programables se encuentran constituidos básicamente por lo siguientes componentes:

- Unidad central de procesamiento

La unidad central de procesamiento es el cerebro del PLC, tiene la función de leer los valores lógicos presentes en las entradas, ejecutar las instrucciones que constituyen el programa y transferir las órdenes de esas instrucciones a las salidas. Consta de dos partes fundamentales: el (los) procesador (es) y las memorias. También puede contener otros elementos, como puertos de comunicación, circuitos de diagnóstico, fuentes de alimentación.

- Fuente de alimentación

Su función es suministrar las tensiones adecuadas para el funcionamiento de la CPU (normalmente conectada a los 220 o 110 V de la red AC). Normalmente, las fuentes de alimentación están diseñadas para proporcionar múltiples voltajes de alimentación para los módulos. El procesador normalmente requiere un suministro de 5 V. Las tarjetas de entrada y salida digitales necesitan energía auxiliar para los elementos de conmutación y conversión. (Garcés Mendoza & Torres Romero, 1999)

- Procesador

El procesador tiene como tarea principal la ejecución del programa realizado por el usuario, sin embargo, también tiene otras tareas, como la gestión de la comunicación y la ejecución de programas de autodiagnóstico. Para realizar todas estas tareas, el procesador necesita un programa escrito por el fabricante, llamado sistema operativo. Este programa no es accesible por el usuario y está registrado en la memoria no volátil que forma parte de la CPU. Actualmente existen PLC que utilizan más de un procesador, pudiendo así dividir tareas y así ganar mayor velocidad de procesamiento y facilidad de programación.

- Memoria

El sistema operativo, el programa de aplicación, las tablas de entrada y salida y los registros internos están asociados con diferentes tipos de memoria. La capacidad de almacenamiento de una memoria se suele cuantificar en bits, bytes o palabras. El sistema operativo es registrado por el fabricante, y dado que debe permanecer inalterado y el usuario no debe tener acceso, se almacena en una memoria como ROM, EPROM o EEPROM, que son memorias cuyo contenido permanece inalterado incluso en ausencia de energía. El programa construido por el usuario debe permanecer estable durante el funcionamiento del equipo y también debe ser fácil de leer, escribir o borrar. Por eso se utilizan memorias RAM o EEPROM para su almacenamiento. Si se utilizan memorias de tipo RAM, también será necesario utilizar pilas, ya que este tipo de memoria se borra en ausencia de energía. Dado que la velocidad juega un papel importante en la velocidad de funcionamiento del PLC, se utilizan memorias de tipo RAM. En resumen, la memoria se

encarga de almacenar toda la información necesaria para el funcionamiento del PLC. (Luzón Calderón & Quinchiguango De La Cruz, 2018)

- Módulo de entradas y salidas

Los antiguos PLC solo se ocupaban de entradas y salidas discretas y esto significaba un control parcial de los sistemas. Con el paso de los años, y debido a la necesidad de mejorar el control de los procesos que ocurren en el mismo, se implementaron en el mercado los llamados módulos de entrada y salida analógica y luego fue posible un mejor control de lo que se quería medir/actuar, ya que las entradas y salidas analógicas permiten un número infinito de valores, mientras que las discretas limitan la información que se puede tratar tanto en la entrada como en la salida.

En el controlador lógico programable (PLC), hay un componente que es tan fundamental como el procesador y la memoria, este componente se llama módulo de entrada y salida. Este módulo se puede dividir en dos partes: la parte de entrada de señal y la parte de salida de señal. Y cada una de estas dos partes también se puede subdividir en dos grupos: el módulo específico que se ocupa de los datos digitales y el módulo específico que se ocupa de la información analógica. (Cibrian Anaya, Luque Vega, & López Neri, 2019)

- Módulo de entrada

Las entradas son el medio de comunicación del PLC con el proceso a controlar. Estas son las interfaces que permiten al PLC recibir información sobre el proceso, aquí es donde se encuentran las señales de un termostato, finales de carrera, pulsadores, manómetros, caudal, y todo tipo de dispositivos que se utilizan para monitorear el proceso y el suministro. Una devolución de información al PLC. Las entradas pueden ser digitales o analógicas y también pueden ser internas o externas. Las entradas externas son aquellas por las que entrará la señal enviada por un sensor al PLC y las internas son las que reciben datos de procesos internos que no son físicos, como el contacto de un temporizador que sirve para conectar otro componente interno o una salida externa. (Luzón Calderón & Quinchiguango De La Cruz, 2018)

Cuando el PLC está en funcionamiento, realiza una secuencia de operaciones llamada ciclo de barrido. Al comienzo de un ciclo de escaneo, el PLC lee los valores que el módulo de entrada pone a disposición y los guarda en su memoria. Los últimos modelos de PLC ya se están fabricando por defecto con algunas entradas para señales digitales integradas directamente en la unidad central de procesamiento y tienen dinámica modular para brindar flexibilidad y reducir el espacio en el ensamblaje, y para ampliar el número de entradas, simplemente conéctelas directamente en el bus del procesador uno o más módulos de expansión compatibles con el PLC en cuestión. La motivación para la popularización de los insumos modulares puede explicarse por la fácil sustitución, en caso de defecto o mantenimiento, del bloque específico y no del equipo en su conjunto, también en casos de ampliación de la planta, es oportuno agregar bloques extra directamente en una ranura o conector del bastidor. (Cibrian Anaya, Luque Vega, & López Neri, 2019)

Dichos módulos contienen terminales individuales para cada conexión de entrada, además de leds que indican el estado de estos y terminales exclusivos con voltaje proveniente del módulo de potencia para brindar la energía necesaria para el funcionamiento de los dispositivos que enviarán alguna señal para la posterior toma de decisiones por parte del procesador.

El número de entradas en cada módulo de expansión puede ser de 8, 16, 32 o 64, separadas por un bloque con terminales de tornillo (conocido como bloque de terminales) para conectar los dispositivos mediante cables a los respectivos terminales de entrada. La sección de los puertos de entrada para información se puede dividir según el tipo de señal que estará disponible por el dispositivo de campo en dos grandes grupos, separados por el mundo de lo discreto y el mundo de lo continuo. (Luzón Calderón & Quinchiguango De La Cruz, 2018)

2.5 TIA Portal

Siemens ha innovado en la integración de todos sus servicios de automatización tanto en software como en hardware, todos estos dispositivos se puede gestionar, programar y supervisar desde el Portal de Automatización Totalmente Integrada (Totally Integrated Automation Portal) por sus siglas en ingles. Desde este entorno integrado, los usuarios pueden tener en una sola plataforma la posibilidad de programar los dispositivos de control y supervisión instalados en sus plantas permitiendo ahorrar costos y tiempos de operación, adicionalmente, toda la gama de dispositivos de control de Siemens son compatibles entre sí, el software cuenta con una amplia biblioteca de cada tipo de dispositivo para agregarlos a los proyectos de programación. El TIA Portal se creó en el año 1996 como una idea innovadora para poder tener en un solo entorno toda la gama de control de los dispositivos Siemens y específicamente de la marca Simatic de Siemens. (Editores SRL, 2018)

2.6 Matlab

MATLAB es un software interactivo de alto rendimiento destinado al cálculo numérico. MATLAB integra análisis numérico, cálculo de matrices, procesamiento de señales y construcción de gráficos en un entorno fácil de usar donde los problemas y las soluciones se expresan solo como están escritos matemáticamente, a diferencia de la programación tradicional. (Gonçalves, Palmero-Marrero, & Oliveira, 2020)

Adicionalmente cuenta con un módulo de simulación llamado Simulink, donde se pueden simular procesos de control y realizar comparaciones y mediciones en tiempo real mediante interfaces de control y comunicación.

2.7 ThingSpeak de Matlab

ThingSpeak permite programar y ejecutar código MATLAB utilizando una versión de MATLAB que MathWorks aloja en la nube. No necesita una licencia de MATLAB para ejecutar MATLAB dentro del servicio web ThingSpeak.

Si inicia sesión en ThingSpeak con una cuenta de MathWorks que no está asociada con una licencia de MATLAB, el código de MATLAB que puede ejecutar dentro del entorno de ThingSpeak está limitado a las funciones proporcionadas por MATLAB. Si inicia sesión con una cuenta de MathWorks que está asociada con una licencia de MATLAB que también tiene licencia para usar cajas de herramientas complementarias, se admiten las funciones proporcionadas por ciertas cajas de herramientas complementarias. (Pasha, 2016)

Puede usar el código y las visualizaciones de MATLAB dentro de ThingSpeak con algunas limitaciones de frecuencia y velocidad de actualización: Un TimeControl puede programar un análisis MATLAB para que se ejecute a intervalos de no más de 5 minutos. Las visualizaciones de MATLAB (gráficos) agregadas a un canal se actualizan después de 10 minutos.

Las limitaciones adicionales que producen un error son: Para los tipos de uso de licencia estándar y académica, el código en la aplicación MATLAB Analysis o en la aplicación MATLAB Visualizations que tarda más de 60 segundos en ejecutarse en la nube produce un error. Para todos los demás tipos de uso de licencias, incluidos los usuarios gratuitos, el código en la aplicación MATLAB Analysis o en la aplicación MATLAB Visualizations que tarda más de 20 segundos en ejecutarse en la nube produce un error. (Abdul-Rahman & Graves, 2016)

MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de información es una matriz que no requiere dimensionamiento. Este sistema permite la resolución de muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que gastaría en escribir un programa similar en lenguaje Fortran, básico o C. Además, las soluciones a los problemas se expresan casi exactamente como están escritas matemáticamente.

MATLAB es un software diseñado para realizar cálculos con matrices (MATLAB = MATrix LABoratory). MATLAB fue creado a finales de la década de 1970 por Cleve Moler, entonces presidente del departamento de informática de la Universidad de Nuevo México. Pronto se extendió a otras universidades y encontró un fuerte uso dentro de la comunidad matemática aplicada. (Gonçalves, Palmero-Marrero, & Oliveira, 2020)

2.8 MySQL

MySQL es un sistema de gestión de base de datos (DBMS), que utiliza el lenguaje SQL (Structured Query Language, el Inglés Lenguaje de Consulta Estructurado) como interfaz. Actualmente es uno de los sistemas de administración de bases de datos más populares de Oracle Corporation, con más de 10 millones de instalaciones en todo el mundo.

El MySQL fue creada en Suecia por David Axmark, Allan Larsson y Michael "Monty" Widenius, que han trabajado juntos desde mediados de 1980. En la actualidad, su desarrollo y mantenimiento emplea aproximadamente a 400 profesionales en todo el mundo, y más de mil contribuyen probando el software, integrándolo con otros productos y escribiendo sobre él. (Combaudon, 2018)

El 16 de enero de 2008, Sun Microsystems adquirió MySQL AB, un desarrollador de MySQL, por mil millones de dólares, un precio nunca visto en la industria de las licencias gratuitas. El 20 de abril de 2009 se anunció que Oracle compraría Sun Microsystems y todos sus productos, incluido MySQL. Luego de las investigaciones de la Comisión Europea sobre la adquisición para evitar la formación de monopolios en el mercado, se autorizó la compra y hoy Sun es parte de Oracle.

El éxito de MySQL se debe en gran parte a la fácil integración con PHP incluida, casi obligatoriamente, en los paquetes de alojamiento de sitios de Internet que se ofrecen actualmente. Empresas como Yahoo! Finance, MP3.com, Motorola, NASA, Silicon

Graphics y Texas Instruments utilizan MySQL en aplicaciones de misión crítica. El MySQL ahora es compatible con Unicode, los índices de texto completo, replicación. (Rautmare & Bhalerao, 2016)

Características

- Portabilidad (compatible con casi cualquier plataforma actual);

Compatibilidad (hay controladores y módulos de interfaz ODBC, JDBC y .NET para varios lenguajes de programación, como Delphi, Java, C / C ++ , C # , Visual Basic, Python, Perl, PHP, ASP y Ruby)

- Excelente rendimiento y estabilidad;
- Poco exigente sobre las nuevas características del hardware;
- Facilidad de manejo;
- Es Software Libre basado en la GPL (sin embargo, si el programa que accede a Mysql no es una GPL, se debe adquirir una licencia comercial) ;
- Contempla el uso de varios Storage Engines como MyISAM, InnoDB, Falcon, BDB, Archive, Federated, CSV, Solid...
- Apoya el control transaccional;
- Admite disparadores;
- Admite cursores (no desplazables y no actualizables);
- Admite funciones y procedimientos almacenados;
- Replicación fácilmente configurable;
- Interfaces gráficas fáciles de usar (MySQL Toolkit) proporcionadas por MySQL Inc.

3 Desarrollo del proyecto

En este capítulo se describe el paso a paso y procedimientos realizados para el funcionamiento del proyecto, desde su construcción e implementación física hasta el almacenamiento de datos en MySQL. La figura **Figura 3-1** muestra el conjunto de la planta construida para el desarrollo del proyecto, se puede apreciar el tanque de control (derecha), el tanque para agregar perturbaciones (izquierda) que tendrá una temperatura diferente a la del tanque de control, las conexiones en tubería PVC de 1 y ½ pulgada, la electrobomba para recircular el fluido de los tanques y el tablero de control con la pantalla HMI al frente para el monitoreo y control de la misma.

Figura 3-1 Disposición de la planta construida



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso.

3.1 Construcción de la planta

Para poder iniciar con el desarrollo del proyecto se tuvo que construir y adecuar una planta a pequeña escala que consta de dos tanques cilíndricos de 40 cm de diámetro y 60 cm de altura para un capacidad total de 70 litros, sin embargo para poder dejar un espacio de conexiones y tuberías se estableció como volumen de trabajo 50 litros de agua, los tanques están fabricados en lámina Coll Roll y recubiertos con pintura electrostática para evitar la corrosión, adicionalmente se realizaron las conexiones con tubería PVC de 1" como se ve en la **Figura 3-2**, para poder interconectar el tanque principal de control y el tanque de back up desde donde se agregarán las perturbaciones al tanque de control para verificar el comportamiento y respuesta de los controladores.

Figura 3-2 Tanques cilíndricos de la planta



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso.

Por otra parte, se realizó la compra de un cofre eléctrico de 60 cm X 40 cm con certificación RETIE para comenzar a realizar las conexiones eléctricas de potencia y control, como se

puede ver en la **Figura 3-3**, tales como acometida general de alimentación de la planta, conexiones de la resistencia de calentamiento y electrobomba centrífuga y conexiones del controlador PLC y la instrumentación de la planta. Todas estas conexiones hacen parte del tablero de control. Adicionalmente se realizó la adecuación e instalación de una pantalla de control HMI Siemens modelo KTP600 Basic Mono PN para poder realizar el control y supervisión del sistema desde ésta.

Figura 3-3 Tablero de control en fase de construcción



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso..

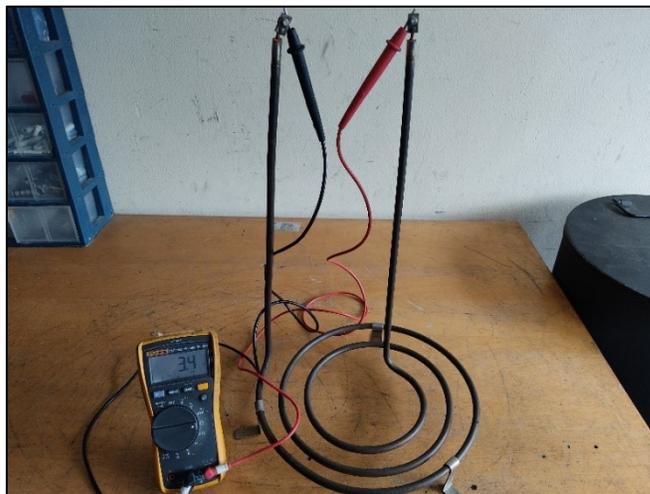
El actuador final, **Figura 3-4**, consta de una resistencia eléctrica de inmersión de $3,0 \Omega$ y un voltaje de operación de 120 VAC, esta será la encargada de elevar la temperatura del tanque de control hasta el valor deseado. Las características eléctricas de la resistencia se muestran en la tabla **Tabla 3-1**. Es importante aclarar que la resistencia deberá estar todo el tiempo sumergida para evitar daños en la misma.

Tabla 3-1 Características resistencia eléctrica

Resistencia:	3,4 Ω
Voltaje de operación:	110 – 120 VAC
Potencia:	5000 W
Corriente:	± 50 A
Calentamiento:	Conducción
Tipo:	Sumergible

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Figura 3-4 Resistencia eléctrica 5 kW



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Para garantizar que la temperatura del tanque sea lo más homogénea posible, se realiza la recirculación del contenido del tanque por medio de una electrobomba centrífuga de ½ HP como se ve en la figura **Figura 3-5** y sus características de operación en la **Tabla 3-2**

Tabla 3-2 Características técnicas electrobomba

Marca:	I Water Pump
Modelo:	QB60
Potencia:	0,5 HP
Voltaje de operación:	110 – 120 VAC
Corriente:	Aprox 3,3 A
Caudal máximo:	35 L/min
Revoluciones:	3560 rpm

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Figura 3-5 Electrobomba de la planta

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

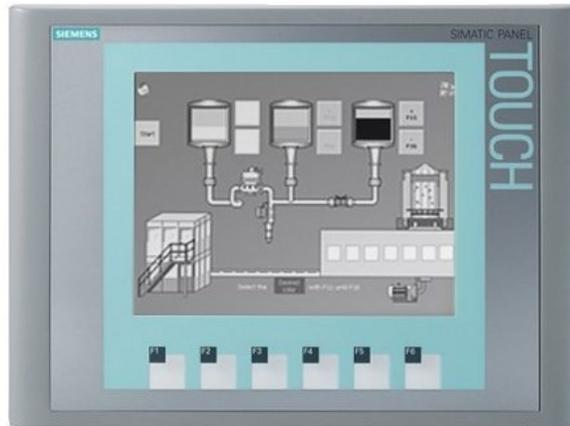
El principal dispositivo de control de la planta como se ve en la **Figura 3-6** consta de un PLC marca Siemens con el cual se realizará la medición de la variable temperatura (por medio del sensor y transmisor), se accionará la resistencia y el motor de la electrobomba el modelo del PCL es S7-1200 CPU 1212C AC/DC/RLY, para más información ver Anexo A.

Figura 3-6 PLC Siemens S7-1200



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Todo el funcionamiento de la planta podrá ser supervisado y controlado mediante una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) marca Siemens modelo KTP600 Basic Mono **Figura 3-7**, la pantalla se programó para poder controlar y visualizar el proceso de la planta, se acondicionó en la misma una gráfica para verificar la tendencia de la temperatura y el esfuerzo de control realizado por el PLC. Las características técnicas se pueden ver en el Anexo B. La programación de la HMI y e PLC se realizó con el software TIA Portal.

Figura 3-7 HMI Siemens KTP600 Basic Mono PN

Fuente: <https://cutt.ly/Wh7HSGk>

La medición de la variable de temperatura se realiza mediante un RTD, detector de temperatura resistivo PT100, su nombre se debe a que a 0°C la resistencia entre los dos terminales del sensor es de $100\ \Omega$. Para que las entradas analógicas puedan ser leídas por el PLC la respuesta debe estar entre 0 y 10 VDC, dado que la salida de la PT100 únicamente es una variación de resistencia, se debe hacer un tratamiento de la señal dada por la misma, para esto se utilizó un módulo transductor para PT100 el cual arroja una salida entre 4-20 mA, para poder tener una entrada de voltaje en los terminales analógicos del PLC, se acopló una resistencia de $500\ \Omega$ y $\frac{1}{4}$ de Watt entre la terminal negativa del PLC y la entrada analógica del mismo para poder tener una señal de voltaje.

Finalmente, para poder accionar la resistencia eléctrica sumergible y debido a su alto consumo de corriente, se realizó la instalación de un relé de estado sólido, como se ve en la **Figura 3-8**, con capacidad de 100 amperios y un voltaje de control de entre 3 y 32 VDC con el fin de activar y desactivar la resistencia por medio de las salidas del PLC

Figura 3-8 Relé de estado sólido de 100 A



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Todas las conexiones fueron realizadas en el tablero de control y uno de los tanques a controlas, se utilizó cable calibre 18 AWG para las conexiones de control y cable 6 y 8 AWG para las conexiones de potencia debido al alto consumo de corriente de la resistencia eléctrica, con el fin de evitar fugas de corriente y preservar la integridad de los usuarios de la planta y el tablero, todas las estructuras se encuentran debidamente aterrizadas y conectadas en el barraje de tierras del tablero principal.

3.2 Caracterización de los componentes de la planta

Para poder modelar correctamente la planta es necesario evaluar el comportamiento de los componentes que intervienen en la misma y los que estén relacionados con el control de la planta, en este caso los componentes de la planta que actúan directamente sobre el control son el tanque donde estará alojado el volumen de agua, el actuador que realizará el calentamiento, en este caso es la resistencia eléctrica sumergible de 5 kW, el sensor de temperatura PT100 y el transductor de la PT100 de 4-20 mA.

3.2.1 Tanque de almacenamiento

A pesar que el tanque es el elemento final de control, no hay un modelamiento específico para el tanque en sí, ya que su función es solamente almacenar el contenido de agua que se calentará, como se mencionó en la sección anterior el tanque es un recipiente cilíndrico donde se manejará un volumen máximo de 50 litros de agua, si se tratara de un control de nivel habría que hallar la razón de cambio con respecto a la altura del mismo, pero en este caso no es necesario.

3.2.2 Resistencia eléctrica sumergible

El actuador final utilizado en el proyecto consta de una resistencia eléctrica sumergible de 5 kW, el funcionamiento es muy simple, al aplicar voltaje en sus dos terminales comienza a circular una corriente a través de la misma y por efecto de la Ley de Joule parte de la energía consumida por la resistencia se escapa de la misma a través de calor. Debido a esto la función de transferencia de la resistencia eléctrica está dada por la salida de calor en función de la entrada del voltaje aplicada a la misma por unidad de tiempo.

Los cálculos del calor generado se pueden hallar mediante la ley de Joule (Ver Ecuación (3-1))

$$Q = I^2 R t \quad (3-1)$$

Donde Q es el calor generado por la resistencia eléctrica en Joules, I es la corriente que circula a través de la resistencia, R es la resistencia en ohms y t es el tiempo durante el cual circula la corriente.

Reemplazando los datos obtenidos durante los experimentos se tiene:

$$Q = 49^2 \text{ Amp} \cdot 3,4 \Omega \cdot 1 \text{ seg} = 8163 \text{ Joules}$$

3.2.3 Sensor de temperatura PT100

El sensor PT100 es un detector de temperatura resistivo, el cual genera un cambio de resistencia óhmica en sus terminales conforme varía la temperatura del medio en el cual se encuentra, debido a su facilidad de conexión, bajo costo y simplicidad de funcionamiento se optó por utilizar este tipo de sensor para poder medir la temperatura del tanque. La caracterización del sensor se realizó mediante la ficha de datos técnicos del sensor, donde se muestra la variación de resistencia para cada valor de temperatura, se tomaron 10 datos como se puede ver en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3 Tabla de datos PT100

Temperatura	Resistencia
0 °C	100,00 Ω
10 °C	103,90 Ω
20 °C	107,79 Ω
30 °C	111,67 Ω
40 °C	115,54 Ω
50 °C	119,40 Ω
60 °C	123,24 Ω
70 °C	127,07 Ω
80 °C	130,89 Ω
90 °C	134,70 Ω
100 °C	138,50 Ω

Fuente: Arian Control & Instrumentation

Con los datos obtenidos se utilizó la ecuación de la pendiente para determinar la ganancia del sensor como se describe en la siguiente ecuación:

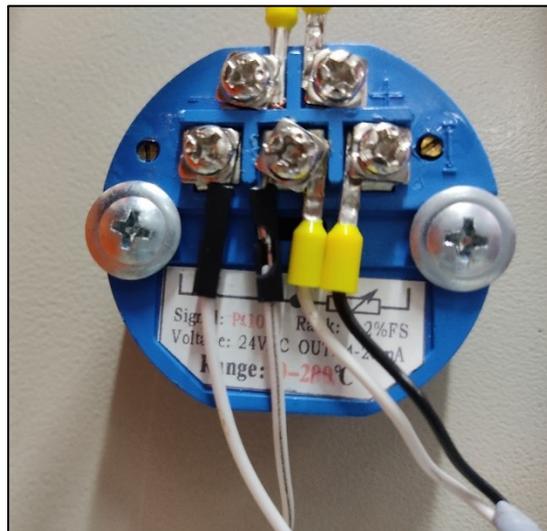
$$K = \frac{138,5 - 100}{100} = 0,385$$

Con estos datos se pudo establecer una ganancia K de 0,385 para la PT100, en la ficha técnica no se evidencia información acerca del tiempo de respuesta del sensor, sin embargo durante pruebas experimentales se observó que la respuesta fue casi instantánea, para efectos prácticos se va a establecer un tiempo de respuesta igual a 0,5 segundos.

3.2.4 Transmisor de temperatura 4-20 mA

Debido a que las entradas analógicas del PLC solo permiten valores entre 0 y 10 VDC fue necesario realizar un tratamiento a la señal dada por la PT100 ya que este sensor solo entrega una variación de resistencia, para poder entregar un valor comprensible por el PLC, se implementó el uso de un transmisor de temperatura para PT100 de 4-20 mA como se ve en **Figura 3-9**

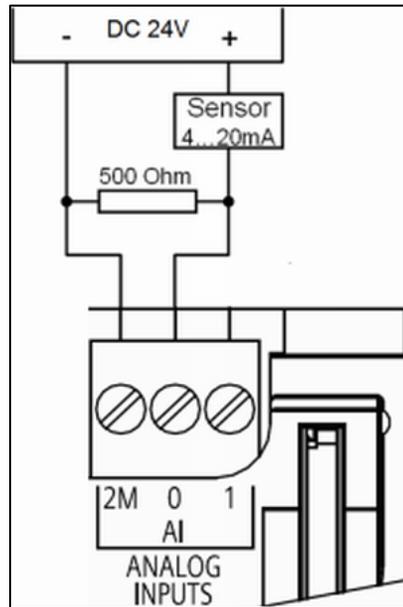
Figura 3-9 Transmisor PT100



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Sin embargo, la salida del transmisor es una señal de 4-20 mA y el PLC únicamente permite entradas de voltaje, por este motivo se instala en paralelo una resistencia de 500 Ω para poder convertir la señal de corriente en voltaje. Esta solución se pudo observar e implementar gracias a la página de soporte en línea de Siemens. La conexión del sensor, la resistencia de 500 Ω y el transmisor se observan en la figura **Figura 3-10**.

Figura 3-10 Conexión PLC + Transmisor + Resistencia



Fuente: Siemens Support: <https://cutt.ly/Yh7DQ3d>

Con estas conexiones adicionales se puede tener una señal permisible para las entradas analógicas del PLC, se realizaron toma de datos experimentales para poder caracterizar la respuesta del transmisor los cuales se anotaron en la **Tabla 3-4**, con los datos obtenidos se logra hallar la ganancia del conjunto del transmisor y sensor.

Tabla 3-4 Respuesta transmisor

Temperatura	Voltaje
16,5 °C	2,655 VDC
19,5 °C	2,718 VDC
25,7 °C	2,946 VDC
41,5 °C	3,529 VDC
55,4 °C	4,058 VDC
76,5 °C	5,003 VDC

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Los valores de temperatura se establecieron con base en los valores del datasheet de la PT100 y los datos obtenidos en la **Tabla 3-3**. Teniendo estos datos se puede establecer la ganancia del conjunto de la PT100 la cual se obtiene aplicando la función pendiente de Excel a los datos de la **Tabla 3-4**. Esta ganancia se establece con un valor de $K=0,0391$.

3.3 Diseño del Control

Una vez se tuvieron todos los componentes conectados y después de haber realizado las pruebas de funcionamiento de cada uno de los elementos de la planta se inicia a diseñar las estrategias de control del funcionamiento de la planta, para esto se comienza con pruebas y registro de datos en lazo abierto del sistema.

3.3.1 Pruebas en lazo abierto

Con el fin de identificar la respuesta del sistema frente a una entrada escalón, se realizan pruebas de funcionamiento del sistema de calentamiento y al mismo tiempo se corroboran los datos obtenidos en la HMI. Se realizaron dos pruebas en lazo abierto, la primera hasta llevar la temperatura del tanque hasta el punto de ebullición a la altura de la ciudad de Bogotá, es decir 91°C , esta temperatura se puede determinar con la ecuación de Sydney-Young (3.2).

$$T_{eb,P} = \frac{T_{eb,760} - 273,15 * K_{SY}(760 - P)}{1 + K_{SY}(760 - P)} \quad (3.2)$$

Donde:

$T_{eb,P}$ = Temperatura de punto de ebullición a la presión atmosférica de Bogotá

$T_{eb,760}$ = Temperatura de punto de ebullición a nivel de mar

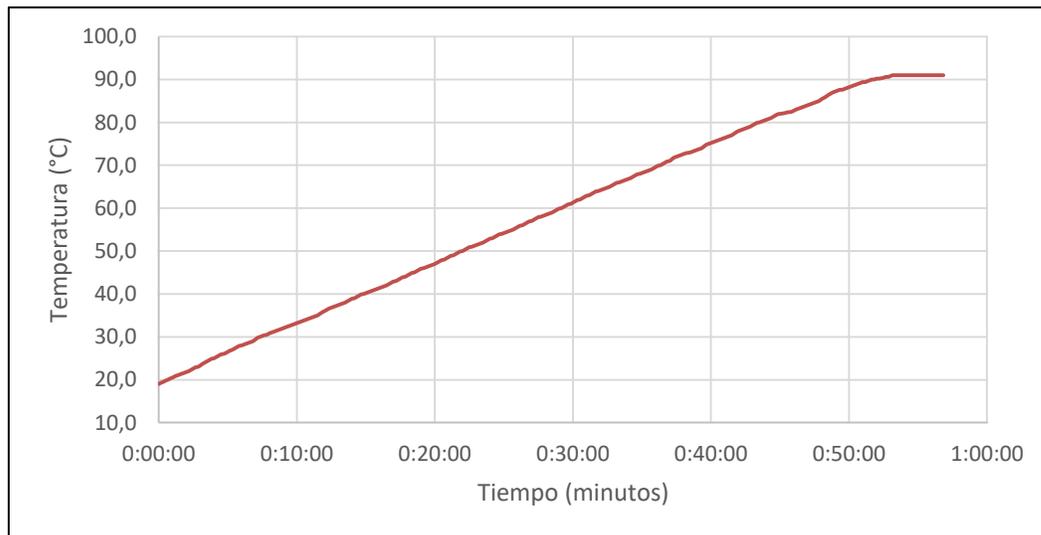
K_{SY} = 0,00012 Constante de Sydney-Young para líquidos polares (agua)

P = Presión atmosférica media en Bogotá (563,7 mmHg) (IDEAM, 2004)

$$T_{eb,P} = \frac{100 - 273,15(0,00012)(760 - 563.7)}{1 + (0,00012)(760 - 563.7)} = 91,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

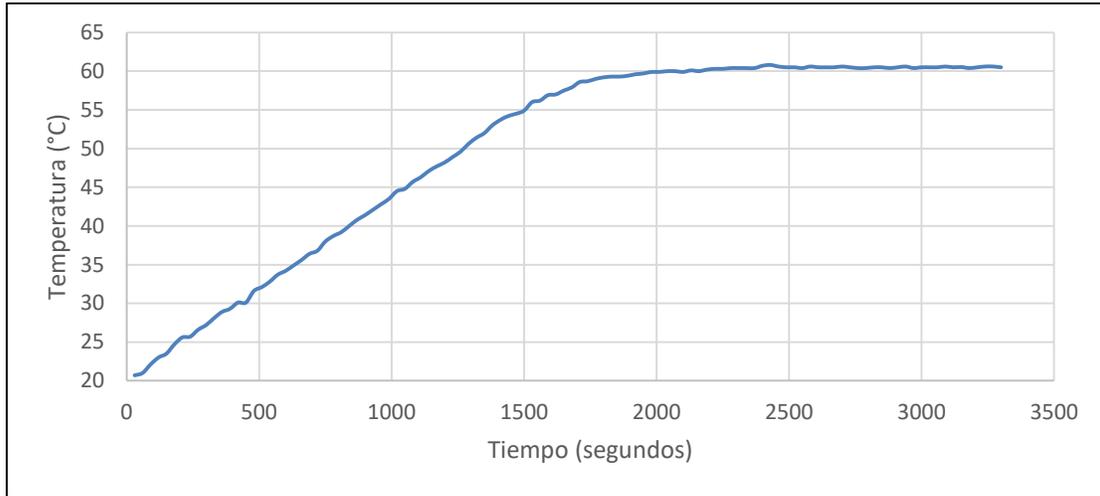
La segunda prueba se realizó hasta llevar la temperatura del agua a 60°C y se mantuvo en 60°C realizando encendido y apagado del breaker de control de la misma. Los datos de las pruebas se pueden observar en la **Figura 3-11**.

Figura 3-11 Prueba No. 1 en lazo abierto



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Como se puede observar en la gráfica, el comportamiento del calentamiento fue casi lineal hasta un punto de estabilización que en realidad se trata del punto de cambio de fase del agua. El mismo comportamiento se observó en la prueba No. 2 que muestra la **Figura 3-12**.

Figura 3-12 Prueba No. 2 en lazo abierto

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Debido a que la tubería utilizada para la recirculación del fluido es en PVC para instalaciones hidráulicas residenciales, la temperatura máxima de trabajo no debe exceder los 70°C, durante la primera prueba se omitió esta información de la tubería resultando en deformación de la tubería y causando filtraciones de agua en las juntas de la tubería, debido a esto se estableció una temperatura máxima de trabajo 60°C para evitar inconvenientes con la tubería y fugas en el sistema, sin embargo, si se desea trabajar con temperaturas más altas se deberá cambiar el tipo de tubería para soportar temperaturas mayores.

Los datos de temperatura en la primera prueba se obtuvieron tomando datos cada 30 segundos del valor de la resistencia y luego comparándolos con la hoja de datos. Para tener una medida más exacta y confiable se utilizó un termómetro digital de registro de datos de 4 canales marca Extech modelo SDL200 (**Figura 3-13**), el cual tiene un periodo de muestreo y almacenamiento de datos desde cada 1 segundos hasta cada 3600 segundos y los almacena en un archivo en su memoria SD interna en un archivo en formato Excel. Para la toma de datos experimental se determinó un periodo de muestreo de 10 segundos. Una vez terminada la prueba se obtuvieron los datos y se realizó la gráfica de la **Figura 3-12**

Figura 3-13 Termómetro digital Extech SDL200



Fuente: Extech <http://www.extech.com/products/SDL200>

3.3.2 Modelamientos matemáticos

Para los modelos matemáticos se parte de las ecuaciones de calor

Teniendo en cuenta que se realizó la compra de una resistencia de 5 kW para poder tener una respuesta lo más rápida posible para el volumen de agua de los tanques, se realizaron los cálculos con el fin de comenzar a caracterizar el comportamiento de la planta. Para los cálculos se utilizó la Ecuación (3-1).

$$Q = mC\Delta T \tag{3-2}$$

Dónde:

Q : Energía calorífica

m : Masa del agua en los tanques

C : Calor específico del agua

ΔT : Cambio de la temperatura en los tanques

Debido a que en los tanques se almacenará agua y se sabe que $m = \rho V$ y el volumen del agua utilizado para la caracterización del tanque fue de 50 litros, la masa de agua utilizada fue de 50 kg, del mismo modo se sabe que el calor específico del agua en Joules son 4186, por lo tanto:

$$Q = (50 \text{ kg}) \left(\frac{4188 \text{ Joule}}{\text{kg K}} \right) (92^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 15.069'600.000 \text{ Joule}$$

Por último la potencia consumida es igual al cociente entre la energía y el tiempo, para el caso experimental, el tiempo que le tomó al agua aumentar su temperatura desde 20°C hasta 92°C fue de 3180 segundos, aproximadamente 53 minutos, por lo tanto la potencia consumida fue de:

$$\text{Potencia} = \frac{15069600000 \text{ Joule}}{3180 \text{ seg}} = 4739 \text{ Watts}$$

Con la ecuación de calor disipado se puede afirmar la potencia necesaria para calentar el agua hasta el valor alcanzado, en este caso los 4739 W obtenidos son congruentes con la potencia de la resistencia que son 5 kW.

Para no profundizar en moldeamientos termodinámicos complejos se realiza el modelamiento matemático de la planta a partir de datos experimentales. Para esto se utilizan los datos obtenidos en lazo abierto

Con los datos obtenidos durante la segunda prueba en lazo abierto se realizó la estimación de la función de transferencia de la planta utilizando las herramientas de Matlab. Para realizar este proceso primero se realizó un tratamiento de datos al archivo generado por el termómetro Extech como realizar la conversión de puntos a comas para que los valores queden en formato número, multiplicar por 10 cada registro para que quede guardado como el tiempo de la prueba y realizar un promedio de las mediciones de la 4 sondas del termómetro, ya que este guarda un registro individual de cada sonda y por último se

eliminan las columnas de nombres de la columnas de cada sonda. La **Figura 3-14** muestra el registro de los 10 primero datos de la prueba en el formato original al momento de descargar la información de la tarjeta SD. Para ver los datos completos de dicha prueba ver Anexo G.

Figura 3-14 Primero 10 datos del termómetro Extech

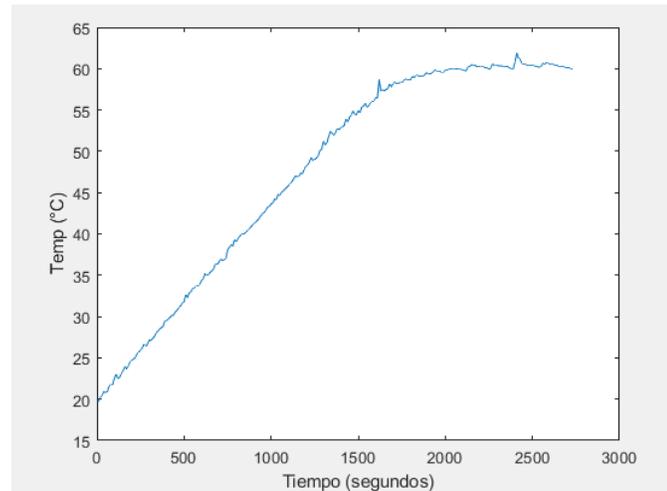
Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit
1	22/12/2020	9:43:28	019.8	T1 KTemp C	019.8	T2 KTemp C	019.8	T3 KTemp C	019.8	T4 KTemp C
2	22/12/2020	9:43:38	020.1	T1 KTemp C	019.9	T2 KTemp C	020.7	T3 KTemp C	020.1	T4 KTemp C
3	22/12/2020	9:43:48	020.5	T1 KTemp C	020.2	T2 KTemp C	021.1	T3 KTemp C	020.2	T4 KTemp C
4	22/12/2020	9:43:58	020.6	T1 KTemp C	020.4	T2 KTemp C	021.6	T3 KTemp C	021.0	T4 KTemp C
5	22/12/2020	9:44:08	021.0	T1 KTemp C	020.5	T2 KTemp C	021.1	T3 KTemp C	020.6	T4 KTemp C
6	22/12/2020	9:44:18	021.0	T1 KTemp C	020.8	T2 KTemp C	021.0	T3 KTemp C	020.8	T4 KTemp C
7	22/12/2020	9:44:28	021.2	T1 KTemp C	021.0	T2 KTemp C	022.5	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
8	22/12/2020	9:44:38	021.5	T1 KTemp C	021.3	T2 KTemp C	022.5	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
9	22/12/2020	9:44:48	021.8	T1 KTemp C	021.7	T2 KTemp C	022.0	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
10	22/12/2020	9:44:58	021.9	T1 KTemp C	021.9	T2 KTemp C	022.1	T3 KTemp C	023.9	T4 KTemp C

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

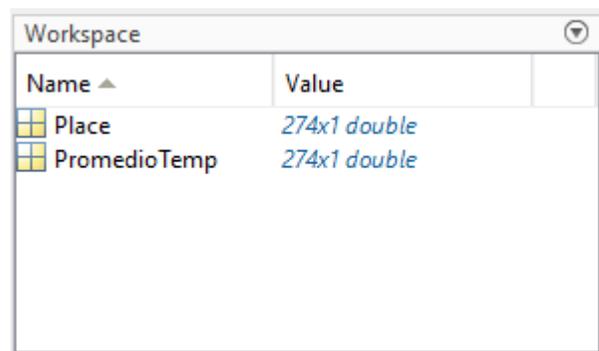
Mediante la función *Import Data* del workspace de Matlab se importan los datos almacenados en el archivo generado por el termómetro para, mediante el *ToolBox System Identification*, obtener una función de transferencia aproximada del comportamiento de la planta. Para verificar que la información haya sido cargada exitosamente se utilizar un *plot* de las variables creadas por el *Import Data*, como se ve en la **Figura 3-15** , la gráfica corresponde al mismo comportamiento de la **Figura 3-12** lo que nos confirma que la información ha sido cargada exitosamente y se encuentra alojadas en las variables del *workspace* como se ve en la **Figura 3-16**.

Para la visualización de los datos se ejecutan las siguientes líneas en el *command window*.

- `plot(Place,PromedioTemp)`
- `xlabel ('Tiempo (segundos)')`
- `ylabel('Temp (°C)')`

Figura 3-15 Gráfica de datos importados en Matlab

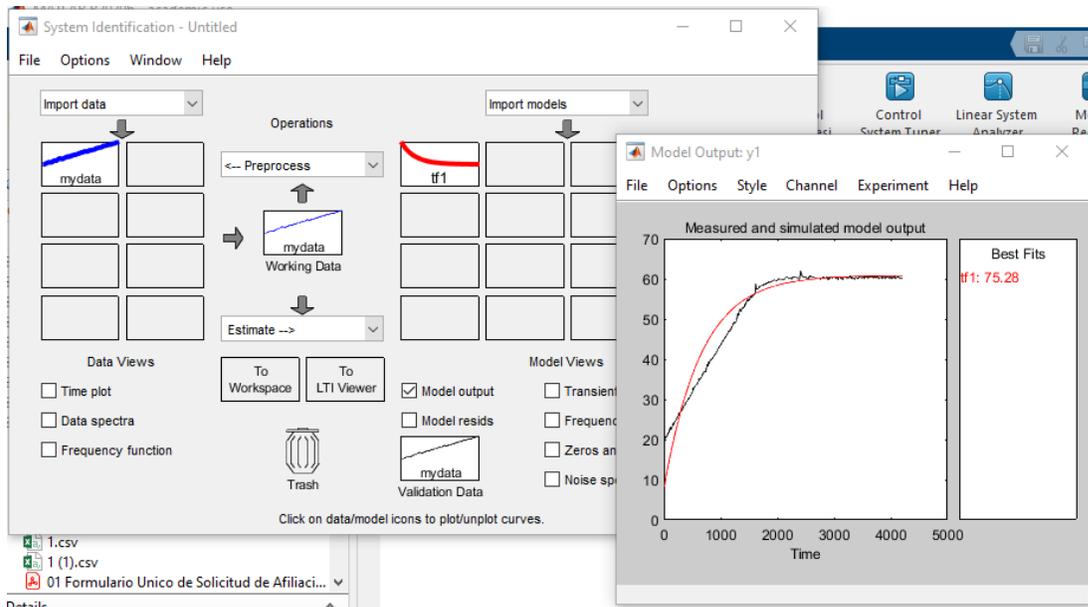
Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Figura 3-16 Importe de datos en Matlab

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Con las variables almacenadas se ejecuta el *system identification* y se importan los datos necesarios, adicional a los mencionados se agregó una variable llamada Input el cual es un vector de tipo *double* con la primera fila en 0 y las demás en 1 para simular una entrada tipo escalón. Se establece el tiempo de muestreo en 10 segundos, los cuales corresponden al periodo de tiempo de almacenamiento de datos del termómetro.

Figura 3-17 Ventana System Identification de Matlab

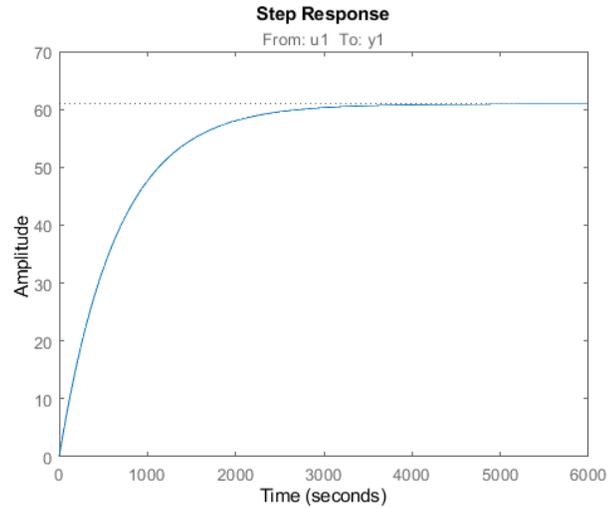


Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Con la ayuda del comando de Matlab se realiza la estimación de la función de transferencia del sistema con base en los datos experimentales, la respuesta tiene una aproximación del 75% al comportamiento de la planta en lazo abierto, lo que nos da un resultado aceptable para la planta ya que no es un proceso complejo y la respuesta del mismo es bastante lenta. La función de transferencia generada por Matlab es la siguiente:

$$TF = \frac{0.09281}{s + 0.001523}$$

Al aplicarle un *step* a la función de transferencia generada se obtiene una respuesta típica de un sistema de primer orden como se ve en la figura **Figura 3-18**

Figura 3-18 Respuesta a FT generada por System Identification

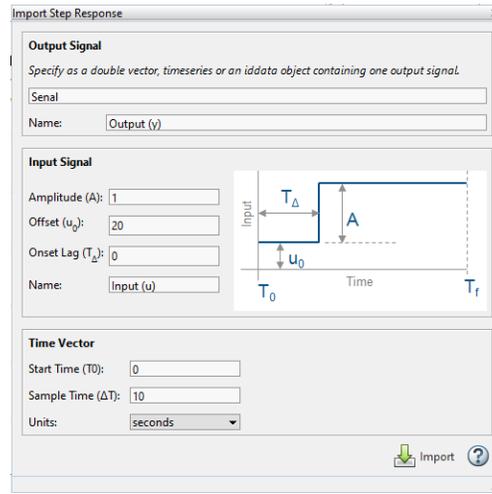
Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Otro método de obtener una función de transferencia a partir de datos experimentales es con la APP *PID Tunner*. Como se muestra en la **Figura 3-19**, desplegando el menú *Plant Identification/Get I/O Data/Step Response* se ingresan los datos almacenados en el *workspace* almacenados como vectores de los datos de la tabla de Excel generada por el termómetro Extech. Para este caso se generó una columna de datos con la resta del valor inicial de la temperatura para iniciar desde 0 y no afectar la ganancia original del sistema, la variable se guardó en el *workspace* como un vector de tipo double y con el nombre de “*Senal*”. La función de transferencia obtenida por medio del *Plant Identification* es la siguiente:

$$TF2 = \frac{42.92}{968.3s + 1}$$

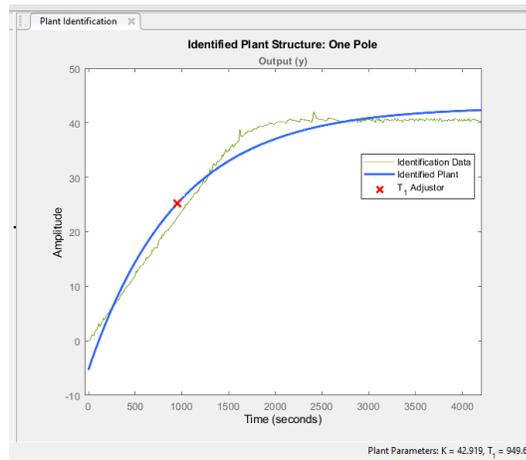
La respuesta a una entrada escalón a la función de transferencia 2 (TF2) se obtiene un comportamiento como se muestra en la **Figura 3-20**.

Figura 3-19 Menú Plant Identification



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Como se puede observar en la parte inferior derecha de la **Figura 3-20** se observa la ganancia del sistema y la constante de tiempo, los cuales fueron almacenados en la TF2.

Figura 3-20 Respuesta a entrada escalón de TF2

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Teniendo los datos obtenidos anteriormente se procede a realizar el modelamiento matemático de los componentes que influyen directamente en la planta como lo son el conjunto tanque + resistencia, el sensor y transmisor y el controlador.

Para el modelamiento del sensor y transmisor se utilizó la ganancia hallada con los datos de la **Tabla 3-4**, la cual como se había mencionado anteriormente se establece en 0,0391. La constante de tiempo para efectos prácticos se establece en 10 milisegundos, con estos datos la función de transferencia del conjunto PT100 y transmisor queda así:

$$TF \text{ sensor} = \frac{0.0391}{0.01s + 1}$$

Esta misma ganancia aplica para la conversión de unidades del set point de grados Celsius a voltaje de control.

El controlador inicialmente se modela de manera simbólica con la fórmula general del controlador PID como se muestra a continuación:

$$TF \text{ controlador} = Kc * \left(Td * s + \frac{1}{Ti + s} + 1 \right)$$

Donde Kc es la ganancia proporcional, el Td es el tiempo derivativo y el Ti el tiempo de integración.

Finalmente todo el conjunto o función de transferencia del lazo de control completo, teniendo en cuenta el controlador, el sensor y el actuador se obtiene la siguiente función de transferencia:

TF global

$$= \frac{4301 Kc * Ti * s^2 + (4301 * Kc + 430100 * Kc * Ti)s + 430100 * Kc}{2420000 * Ti * s^3 + 242002500 * Ti * s^2 + (250000 * Ti + 430100 * Kc * Ti)s + 430100 * Kc}$$

3.3.3 Valores de Kc, Ti y Td por Ziegler-Nichols

Con base en los datos experimentales se realizaron los cálculos para hallar la constantes de proporcionalidad, integración y derivativa. Para efectos prácticos se estableció un tiempo muerto de respuesta del sistema de 100 segundos, con el fin de aplicar este método. El cálculo de las constantes se realizó con la función de transferencia del sistema en lazo abierto y aplicando un *delay* o retardo de 100 segundos. Se aplican las reglas de sintonías de Ziegler-Nichols como se observa en la **Figura 3-21**

Figura 3-21 Reglas de sintonía de Ziegler Nichols a entrada escalón

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: Ingeniería de control moderna, Ogata.

Utilizando el *delay* L de 100 segundos y la constante de tiempo T de 949 segundos, se realizan los cálculos para las constantes del controlador PID.

$$K_p = 0,5 * \frac{949}{100} = 4,75$$

$$T_i = 2 * 100 = 200$$

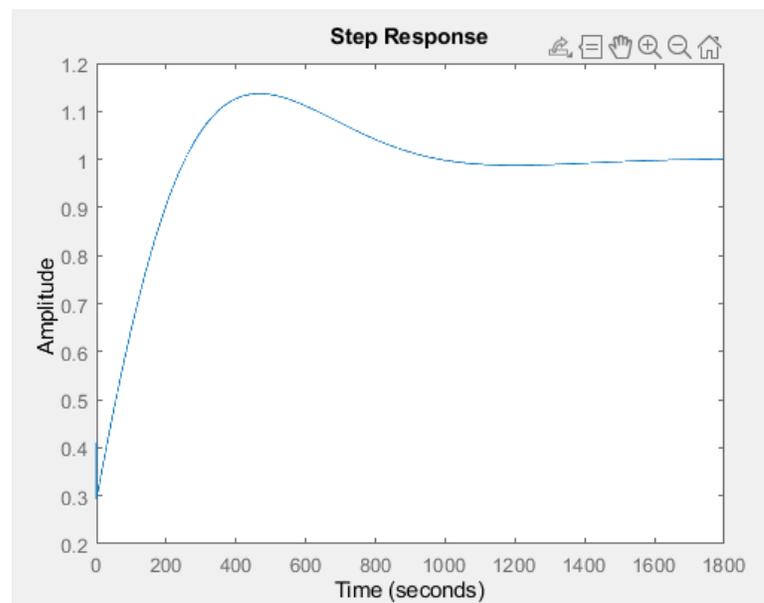
$$T_d = 0,5 * 100 = 50$$

Aplicando estos valores en la función de transferencia global se obtiene la siguiente TF:

$$TFG = \frac{1.543E08 s^5 + 1.544E10 s^4 + 3.246E08 s^3 + 1.862E06 s^2 + 1594 s}{3.748E08 s^5 + 5.291E10 s^4 + 4.02E08 s^3 + 1.902E06 s^2 + 1594 s}$$

La respuesta a una entrada escalón a la función de transferencia global se puede observar en la **Figura 3-22**.

Figura 3-22 Respuesta a entrada escalón a TFG



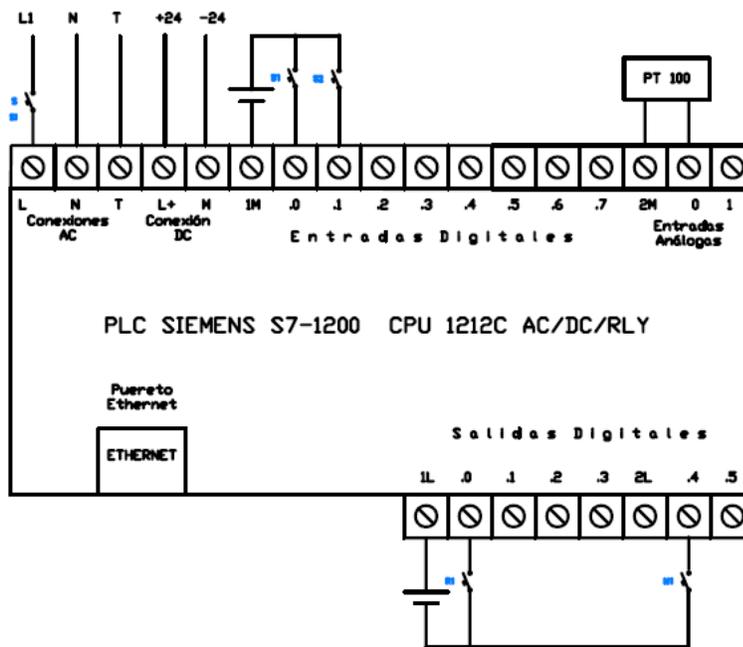
Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

El Anexo F muestra otros métodos de sintonización de los controladores de tipo experimental mediante las funciones de Matlab.

3.4 Programación del PLC y controladores

Las conexiones físicas de la lógica cableada se realizaron según como lo muestra la **Figura 3-23**, se utilizaron dos entradas digitales 1M.0 y 1M.1 para las entradas del selector manual-automático y encendido de la electrobomba respectivamente. En la entrada analógica 2M.0 se realizó la conexión del módulo transmisor PT100 para la lectura de la temperatura. En las salidas digitales se utilizaron dos de ellas, 1L.0 y 2L.4 para la activación del relé de estado sólido que activa la resistencia eléctrica y el contactor de la electrobomba respectivamente.

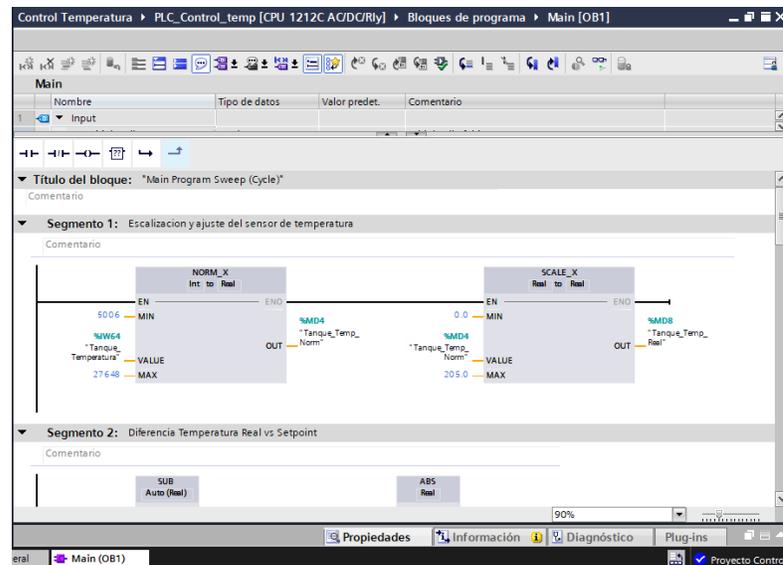
Figura 3-23 Esquema de conexiones PLC



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Para la programación del PLC se utilizó el software TIA Portal de Siemens, el cual permite integrar todos los dispositivos de control que intervienen en la planta de una manera práctica y sencilla. La programación de la lectura de la entrada analógica correspondiente a la PT100, los modos de control y la diferencia entre los “set point” y “present value” se realizaron en el bloque “main” del programa como se ve en la **Figura 3-24**, este bloque es el encargado de realizar la lectura de variables de entradas y salidas de manera cíclica y realizar las comparaciones para adecuar la variable de control al valor deseado.

Figura 3-24 Bloque Main del TIA Portal



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

El entorno del TIA Portal y el PLC S7-1200 tiene incluido en sus librerías un bloque de control PID para diversas variables a controlar, esta función viene en el menú de “Objetos tecnológicos”. Dentro de este menú se puede agregar el bloque PID y configurar según las necesidades del proyecto, adicionalmente tiene una opción de optimización y optimización fina, con el cual el PLC realiza una auto calibración de las ganancias para cada bloque del control. Debido a que la respuesta del sistema es demasiado lenta no es conveniente utilizar este tipo de auto calibración ya que requiere de una frecuencia de activación alta en las salidas digitales del PLC lo que podría afectar el funcionamiento del relé de estado sólido. Todas las variables de trabajo se definen en el bloque del PLC, tanto las físicas

como las virtuales, esto con el fin de poderlas llamar desde las pantallas de configuración y visualización de la HMI.

El diagrama de flujo del control del PLC se puede observar en la **Figura 3-25**, se detalla los principales pasos y rutinas que realiza el PLC. Cada paso fue verificado y se diseñó para ser lo más práctico posible

Figura 3-25 Flujograma Control PLC

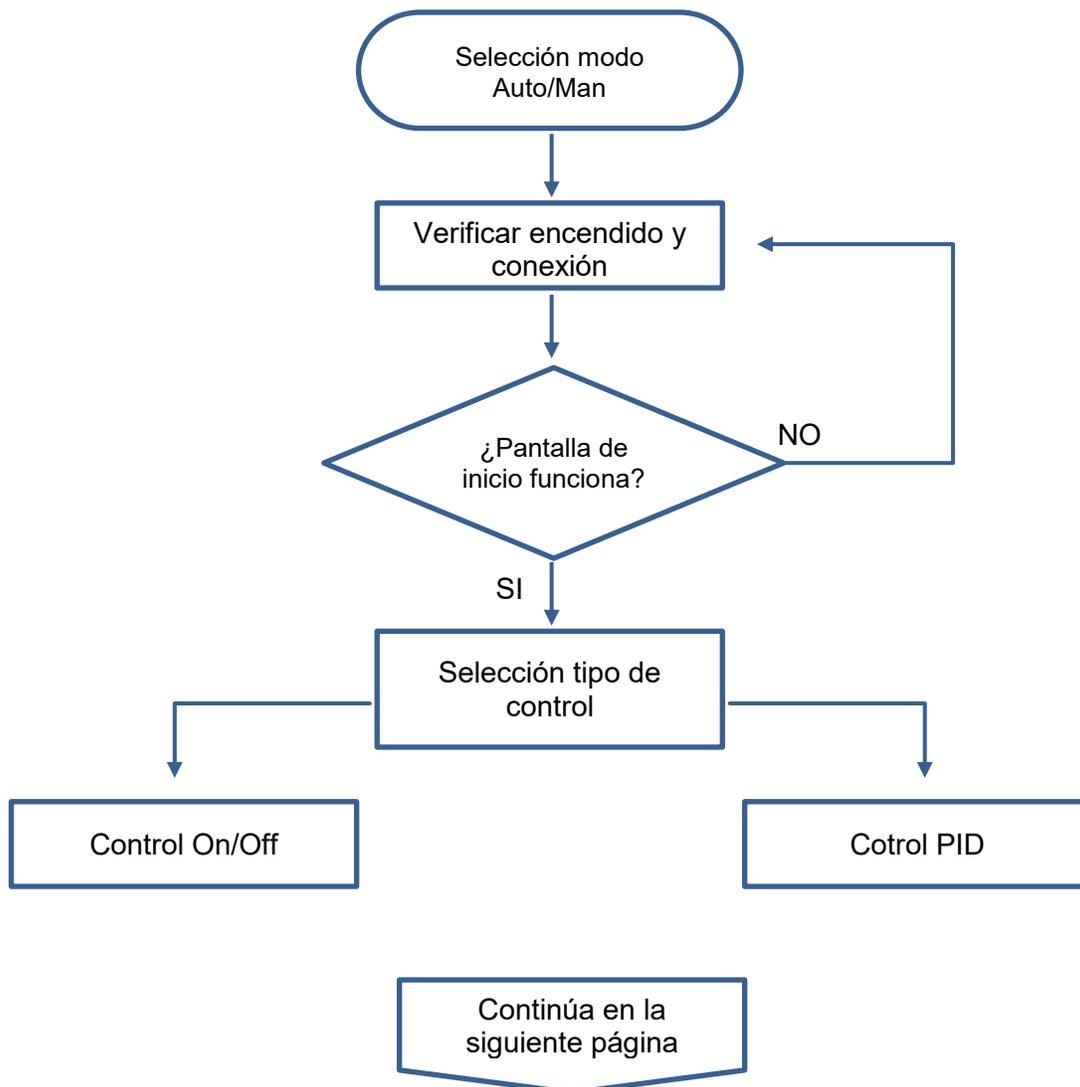
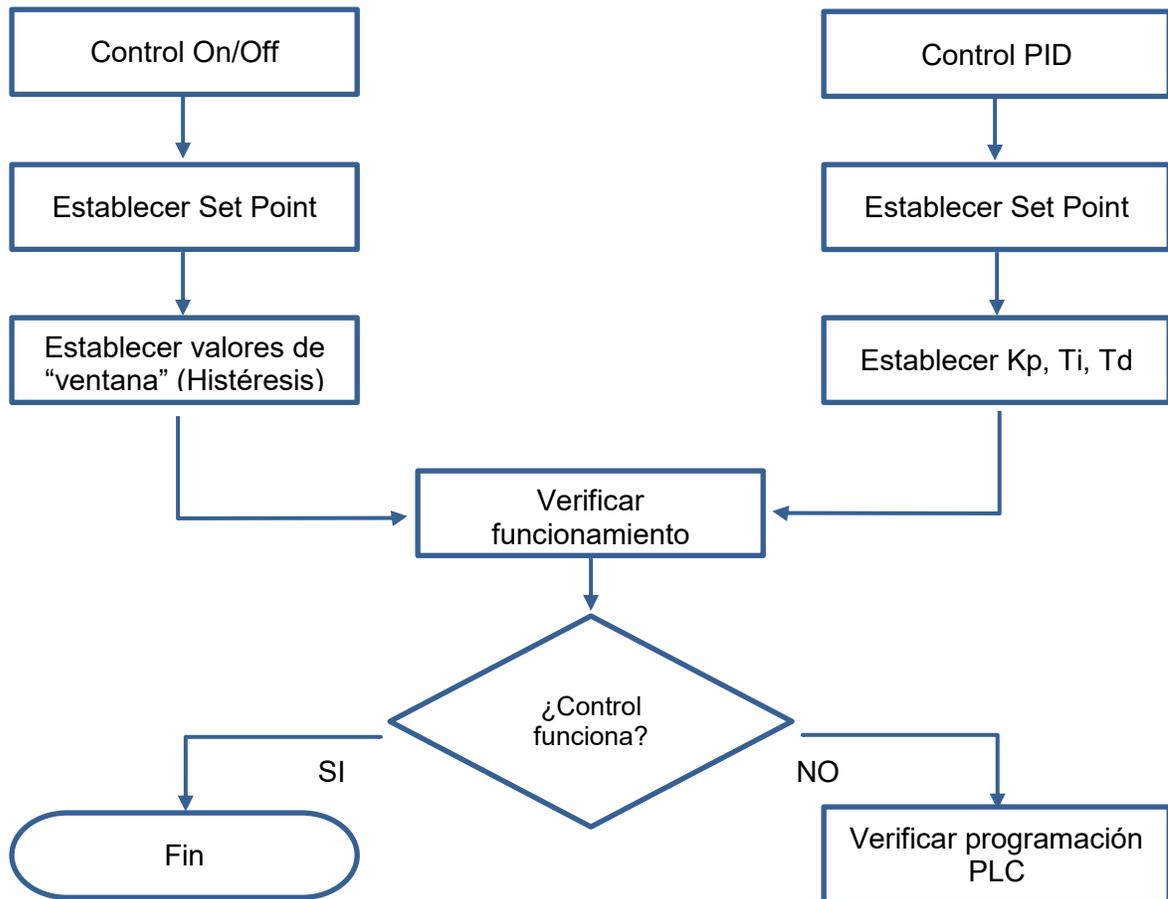


Figura 3-26 Flujograma Control PLC (Continuación)



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Como se puede observar el control de la planta es bastante simple y didáctico gracias a la programación de la HMI la cual permite ingresar los valores de Set Point, ventanas y ganancias del controlador de una manera muy sencilla.

3.5 Programación y diseño de la HMI

En el mismo software que se realizó la programación de los bloques de ejecución del PLC también se realizó el diseño y programación de la interfaz hombre-máquina. El TIA Portal cuenta con una amplia librería de dibujos, elementos y representaciones de los componentes más comunes de una planta como tanques, válvulas, tuberías, bombas, etc. Para el diseño de cada una de las 5 pantallas se utilizaron varios elementos de las librerías así como los switches y cuadros de texto necesarios para poder supervisar y controlar la planta mediante la HMI.

La HMI KTP600 Basic Mono PN cuenta con la posibilidad de crear usuarios y perfiles para la manipulación de la misma, sin embargo, por tratarse de un trabajo didáctico y que no implica un proceso crítico, no se realizó esta configuración. A continuación se detalla cada una de las pantallas creadas y su función.

La conexión entre el PLC y la HMI es por medio de protocolo Profinet, es decir vía Ethernet. La elección de la HMI es sumamente importante debido a que en el mercado también se consiguen con protocolo Profibus y para que tenga conexión entre el PLC y la HMI de ese tipo es necesario instalar un módulo de conversión de costo elevado. La HMI maneja una dirección IP por default o se puede asignar una desde la pantalla de configuración, esta dirección es necesaria conocerla para poder programar la misma y que tenga gestión con el PLC.

3.5.1 Pantalla de inicio

La **Figura 3-27** muestra la pantalla de inicio que aparece luego que el sistema inicie y la HMI se enciende, es importante aclarar que antes que aparezca la pantalla principal del trabajo aparece una pantalla de configuración de la pantalla, donde se configuran los parámetros generales del funcionamiento de la HMI como puntos de calibración, hora y fecha, dirección IP y MAC, etc. La pantalla de inicio es básicamente la presentación del trabajo y del autor del mismo.

Figura 3-27 Pantalla de inicio HMI



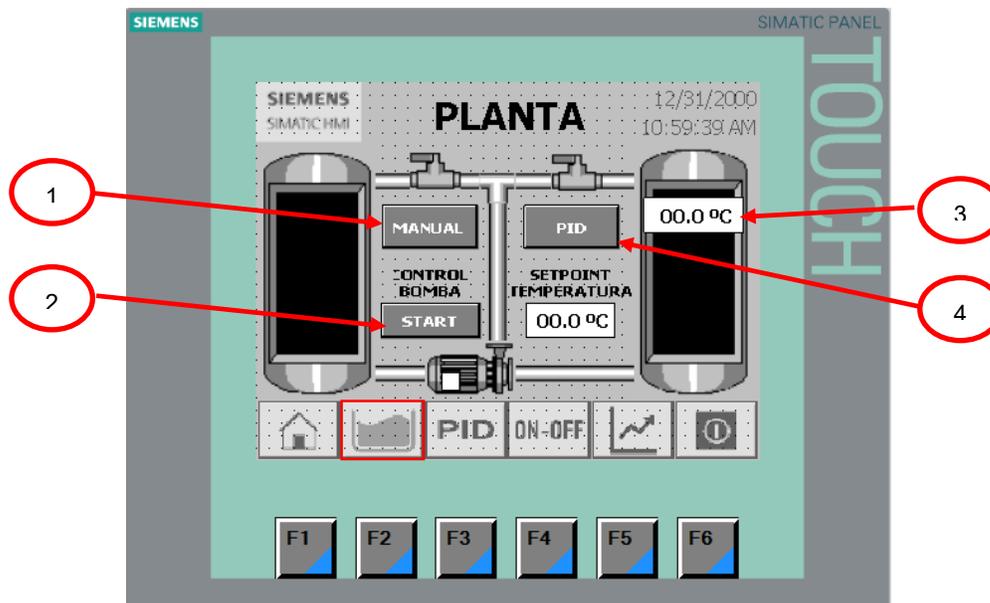
Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

A esta pantalla se puede acceder oprimiendo el primer ícono de izquierda a derecha en forma de casa  .

3.5.2 Pantalla de Overview o visualización de la planta

Como su nombre lo indica la pantalla de overview que se ve en la **Figura 3-28** muestra el esquema general del diseño de la planta, se pueden observar los dos tanques interconectados por la tubería y la electrobomba centrífuga. Por otra parte los íconos que se muestran en la **Figura 3-28** tienen las funciones de indicar el estado en que se encuentra la planta (manual o automático), esta función se puede ver en el ícono 1, el segundo ícono tiene la función de activar la bomba de recirculación de agua de los tanques, el indicador No. 3 muestra el valor presente de la temperatura en el tanque de control, mientras que el ícono 4 indica en qué tipo de control se encuentra funcionando la planta si en ON-OFF o PID. Por último, el ícono “set point temperatura” indica el valor deseado de temperatura al que se quiere llevar el agua contenida en el tanque.

Figura 3-28 Pantalla de visualización de la planta

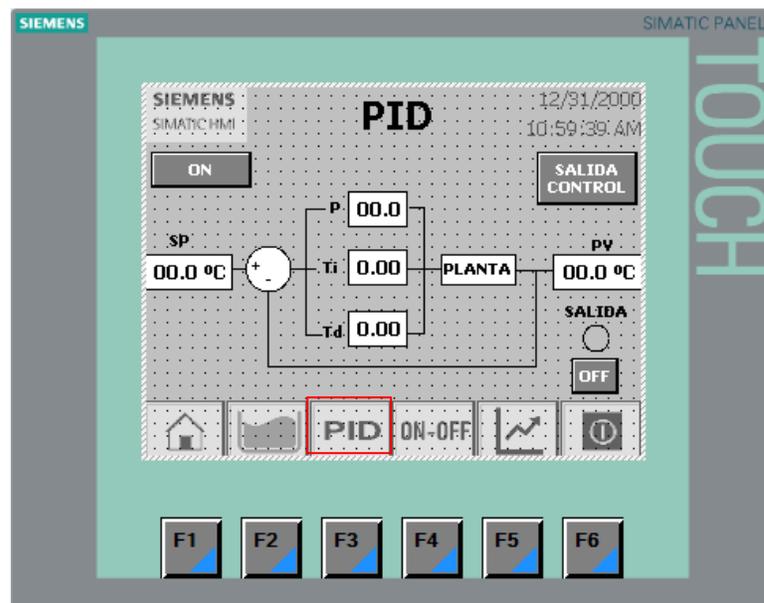


Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

3.5.3 Pantalla Control PID

La pantalla PID que se ve en la **Figura 3-29** corresponde al control PID de la planta, tiene un botón en la esquina superior izquierda de encendido para activar el tipo de control PID al sistema, dispone de un mímico donde se muestra la forma en bloques del controlador, donde el usuario puede ingresar el valor de Set Point en el ícono “SP”, esta valor es leído por la lógica del PLC y activa la acción de control para llevar la temperatura al nivel deseado, del mismo modo se encuentran los tres íconos de “P”, “Ti” y “Td” los cuales corresponden a los valores que ingrese el usuario para los valores de la ganancia proporcional, constante de tiempo de integral y constante de tiempo derivativa respectivamente.

Figura 3-29 Pantalla control PID

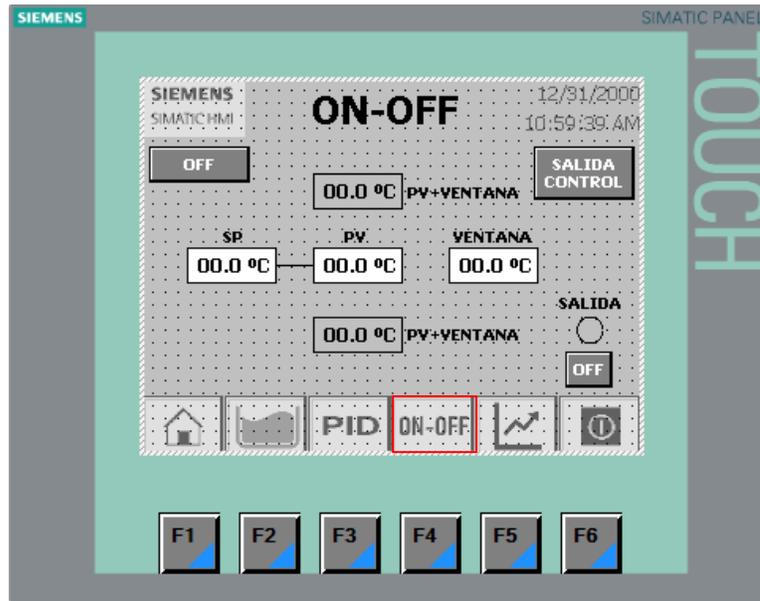


Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

El bloque PID del entorno de TIA Portal cuenta con un par de funciones de pretuning y fine tuning, los cuales realizan una sintonización automática del control y genera las ganancias adecuadas para el control, sin embargo, debido a que la planta tiene una respuesta tan lenta no es conveniente utilizarlo ya que utiliza una alta frecuencia de activación que podría dañar el relé de estado sólido que activa la resistencia, el cual para cargas de corriente alterna debe ser de máximo 10 Hz. La pantalla muestra la opción “Salida Control” la cual permite activar o desactivar el modo manual o automático para encender o apagar la resistencia en este modo.

3.5.4 Pantalla Control On-Off

La pantalla del tipo de control On-Off que se observa en la **Figura 3-30** es desde donde se realiza este tipo de control, su funcionamiento es bastante simple, del mismo modo que el control PID cuenta con una ícono en la parte izquierda donde el usuario puede ingresar el set point o valor deseado de temperatura del tanque, el ícono de visualización del medio muestra el valor actual de temperatura en el tanque, se indica mediante las letras PV (present value por sus siglas en ingles), este ícono es netamente informativo y no permita entradas del usuario. Por último, en la parte derecha del proceso se muestra el ícono “ventana” el cual es un valor que se le da al control para que el actuador se encienda cuando el valor del present value esté por debajo del set point menos el valor de la ventana o se encienda cuando el present value esté por encima del valor del set point más el valor de la ventana, básicamente es una histéresis o ventana de control.

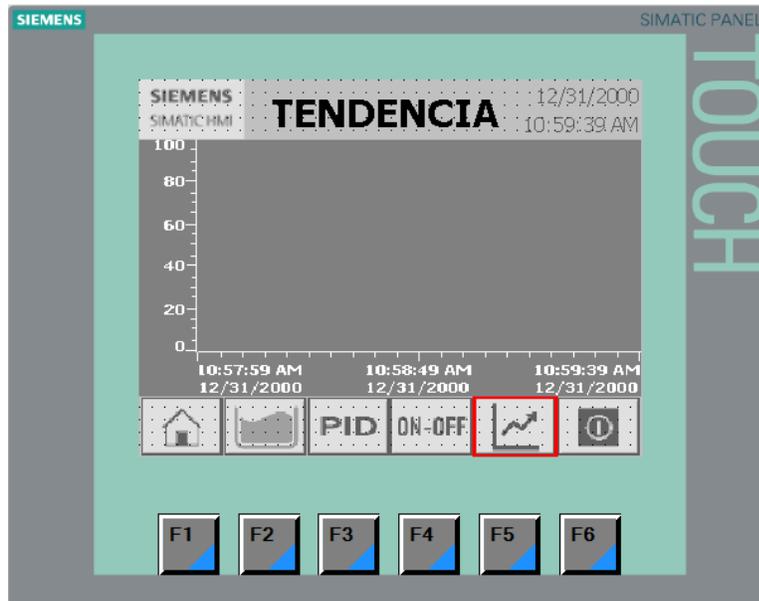
Figura 3-30 Pantalla Control On-Off

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

3.5.5 Pantalla de gráfica de tendencia

La pantalla que se muestra en la figura **Figura 3-31** corresponde a una visualización de la tendencia del valor actual de temperatura de la planta, el set point y el esfuerzo de control mediante una gráfica tipo X Y donde el eje x es el tiempo transcurrido y el eje Y corresponde a la temperatura y del mismo modo al porcentaje de esfuerzo de control del sistema, para poder ver mejor los cambios y las tendencias en la gráfica y hacer más dinámica la visualización, se configuró un tiempo de registro de los últimos cien segundos.

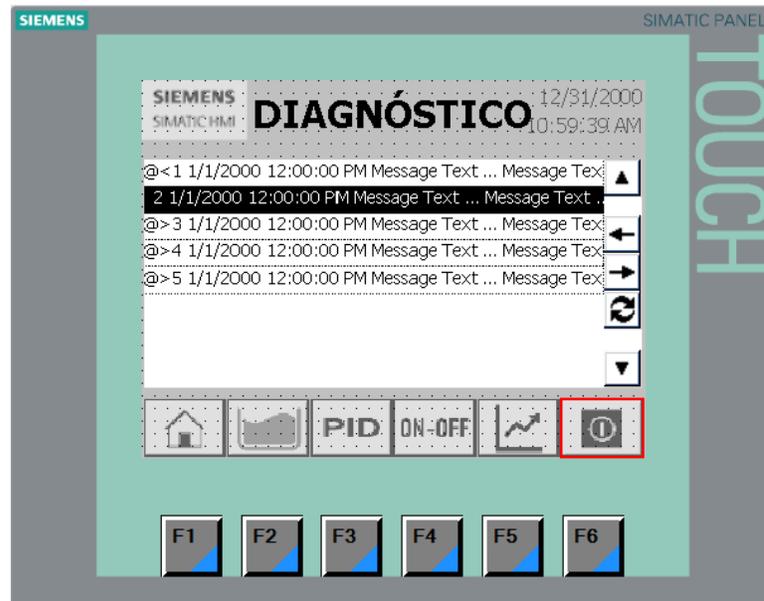
Figura 3-31 Pantalla de gráfica de tendencia



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

3.5.6 Pantalla de diagnóstico

Se trata de una pantalla por default que trae la pantalla para visualizar las alarmas establecidas por el usuario al momento de la configuración, también muestra mensajes de alerta en caso de perder comunicación con el PLC, en el caso del proyecto no se dejaron alertas establecidas. La pantalla de diagnóstico se puede ver en la **Figura 3-32**.

Figura 3-32 Pantalla de diagnóstico

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

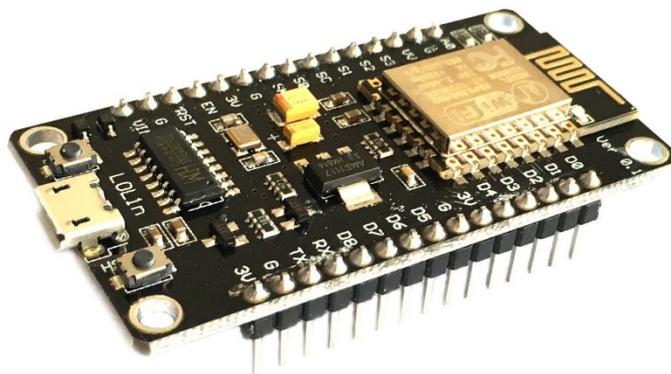
Todas las pantallas pueden ser modificadas mediante la programación por el TIA Portal, en caso que se requiera realizar alguna modificación se debe apagar la pantalla o el PLC y realizar la conexión y cargue del programa a los mismos.

3.6 Migración de datos a ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma para desarrollo de aplicaciones, monitoreo de sensores y desarrollos para las Internet of Things o internet de las cosas por sus siglas en inglés, esta plataforma permite visualizar las medidas de algunos sensores mediante una programación por medio de controladores didácticos como Arduino, Matlab o Simulink, visualizar por medio de gráficas o indicadores los datos de las variables que se estén midiendo e importar y exportar los datos para tratamientos posteriores, incluso permite generar códigos de Matlab a partir de los datos recolectados por la misma.

Para el desarrollo del proyecto e incentivar el internet de las cosas, la conectividad y aprovechando las licencias estudiantiles que poseen los estudiantes de la UAN, se desarrolló un código en Arduino para poder utilizar la misma medición de la PT100 instalada en la planta para poder subir a la nube de ThingSpeak los datos de la temperatura de la planta. Se optó por utilizar el módulo WiFi ESP8266 NodeMCU, el cual permite realizar programación mediante el software de Arduino, debido a su versatilidad, fácil programación y bajo costo. En un principio se deseaba utilizar únicamente el PLC para realizar la gestión de datos, sin embargo, se requieren módulos y extensiones del PLC que por ser marca Siemens son demasiados costosos, así que se optó por utilizar el NodeMCU que se observa en la figura **Figura 3-33**. La programación de este módulo es bastante sencilla (Ver Anexo E), para que los datos sean escritos en los campos de ThingSpeak se debe configurar una red WiFi que se conecte con el módulo, ingresar los datos del ID del canal de ThingSpeak, el campo y el código API Key, que es prácticamente una llave o permiso para que el sensor junto con la programación pueda escribir en los campos de ThingSpeak y por último establecer el intervalo de tiempo de escritura del sensor en el campo de ThingSpeak.

Figura 3-33 Módulo NodeMCU ESP8266



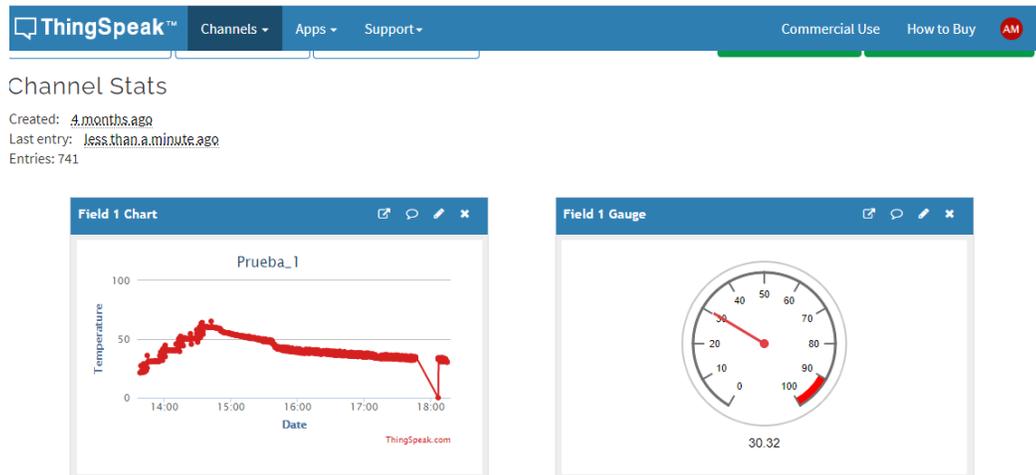
Fuente: Iberrobotics <https://cutt.ly/rjebwPH>

La información almacenada en la nube de ThingSpeak puede ser exportada a formato HTML o CSV para el tratamiento de los datos.

La interfaz de ThingSpeak permite personalizar las gráficas de visualización, modificar las escalas de los ejes, dejar el canal en modo privado o público, borrar los datos almacenados o eliminar el canal completamente, la **Figura 3-34** muestra un ejemplo de la visualización de las medidas tomadas por la PT100.

Debido a que se tuvo que acondicionar la señal para que fuera leída por las entradas analógicas del PLC, la señal de la PT100 en voltaje está variando entre 2,65 y 5,5 VDC (ver **Tabla 3-4**) y el voltaje máximo soportado por el módulo NodeMCU es de 3 VDC, hubo la necesidad de realizar otro acondicionamiento de la señal con un divisor de voltaje, se utilizaron dos resistencias de 33 k Ω y 47 k Ω para obtener una señal de voltaje menor a 3 voltios para la temperatura máxima de trabajo para que pudiera ser leído por el pin A0 de entrada analógica del módulo ESP8266. Con este acondicionamiento de señal y el cálculo de la pendiente e intercepto con el eje Y se pudo tener la señal de temperatura acertada e igual con la mostrada en la pantalla HMI.

Figura 3-34 Interfaz de ThingSpeak



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Cualquier persona tiene la posibilidad de ver los datos almacenados que no hayan sido borrados del campo configurado mediante el siguiente enlace:

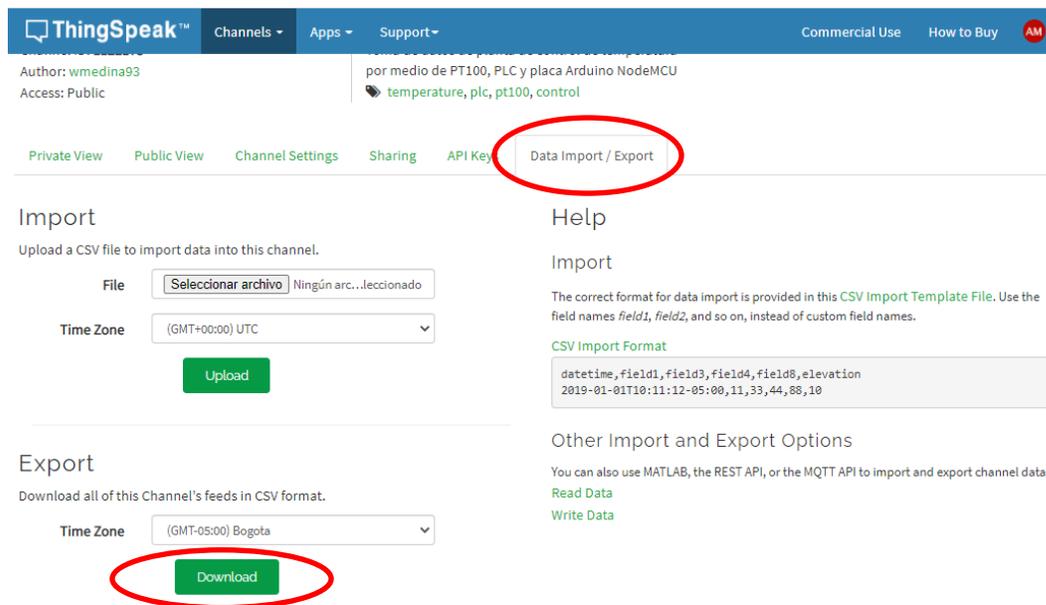
<https://thingspeak.com/channels/1122175>

3.7 Almacenamiento de datos en MySQL

Para el almacenamiento de datos en una base de datos relacional se utilizó el software MySQL Workbench, la finalidad de esto era poder tener los datos en un software especializado en el tratamiento y manejo adicional de datos. Para poder realizar la gestión se realizó un sencillo código de programación en MySQL y unos pasos para poder realizar la importación de los datos en el software.

Los datos que se importaron a MySQL fueron los datos almacenados en la plataforma de ThingSpeak, para obtener los datos se ingresa a la página de ThingSpeak, se selecciona el menú de *Data Import/Export* como se muestra en la figura **Figura 3-35**, esta opción genera un archivo en Excel con extensión .CSV los cuales se importan en MySQL.

Figura 3-35 Procedimiento Exportar datos de ThingSpeak

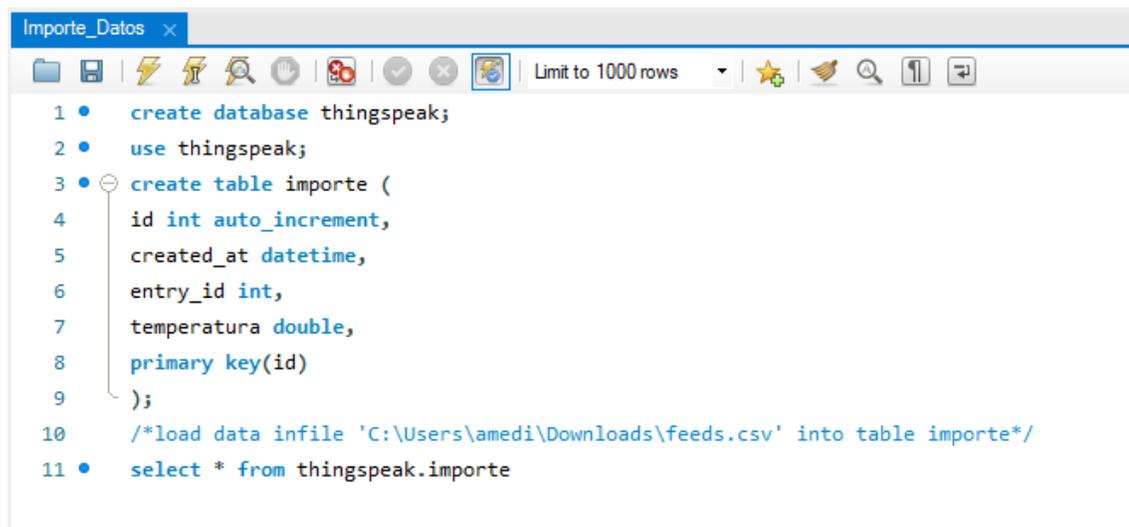


The screenshot shows the ThingSpeak web interface. At the top, there is a navigation bar with 'Channels', 'Apps', and 'Support' menus. Below this, the channel name 'temperature, plc, pt100, control' is visible. A red circle highlights the 'Data Import / Export' link in the top navigation bar. Below the navigation bar, there are two main sections: 'Import' and 'Export'. The 'Import' section has a 'File' input field with a 'Seleccionar archivo' button and a 'Time Zone' dropdown set to '(GMT+00:00) UTC'. The 'Export' section has a 'Time Zone' dropdown set to '(GMT-05:00) Bogota' and a 'Download' button, which is also circled in red. To the right of the 'Export' section, there is a 'Help' section with 'Import' instructions and a 'CSV Import Format' example: 'datetime,field1,field3,field4,field8,elevation 2019-01-01T10:11:12-05:00,11,33,44,88,10'. Below the 'Help' section, there are links for 'Read Data' and 'Write Data'.

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Una vez se ha obtenido el archivo .CSV se ingresa a MySQL Workbench, se crea un nuevo archivo y se ejecutan las líneas que se muestran en la figura **Figura 3-36**, estas líneas de código crean una tabla con los nombres de las columnas que tiene el archivo de ThingSpeak donde se almacenarán los datos del archivo. Se debe especificar el tipo de carácter que contiene cada columna para que no se generen errores al momento de importar la información.

Figura 3-36 Código de creación base de datos MySQL

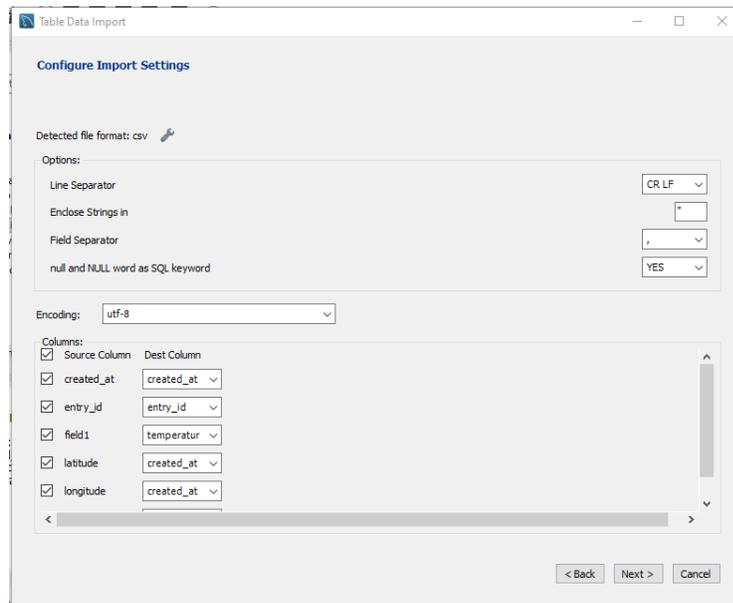


```
1 • create database thingspeak;
2 • use thingspeak;
3 • create table importe (
4   id int auto_increment,
5   created_at datetime,
6   entry_id int,
7   temperatura double,
8   primary key(id)
9 );
10 /*load data infile 'C:\Users\amedia\Downloads\feeds.csv' into table importe*/
11 • select * from thingspeak.importe
```

Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

Para realizar la importación de datos luego de haber creado la tabla se utiliza la opción *Table Data Import Wizard*, mediante este menú se selecciona el archivo descargado de ThingSpeak, se especifica la dirección, el tipo de línea del sistema operativo desde donde se extraen los datos (Linux, Microsoft Window o Mac) con las opciones LF, CR+LF o CR, respectivamente. La figura **Figura 3-37** muestra la configuración de los datos a importar.

Figura 3-37 Configuración de importe de datos a MySQL



Fuente: Andrés Medina, Cristian Buitrago, Juan Alfonso

La información importada queda almacenada en la tabla creada anteriormente con el código como un archivo de solo lectura el cual se puede exportar nuevamente a Excel, el Anexo J complementa la información y modo de importación de datos a MySQL.

4 Resultados

Para verificar el correcto funcionamiento del conjunto planta/control/HMI/ se realizaron diversas pruebas en lazo abierto, con el tipo de control On-Off, PI y PID. Se analizaron las respuestas de la planta y la comunicación con ThingSpeak.

- Se construyó la planta de acuerdo al planteamiento inicial, sin embargo para reducir los tiempos de respuesta se construyeron los tanques casi un 50% de su capacidad inicial.
- Se realizaron las marcaciones de todos los cables para identificarlas en las borneras de conexión y facilitar la identificación de cables y señales.
- Se pudo tener una medida bastante aproximada de la temperatura real del tanque con la censada en el PLC y la HMI.
- Se logró configurar el PLC y la HMI por medio del software TIA Portal y gracias la página Electro All por compartir el link de descarga e instructivo de instalación del Software. <https://www.electroallweb.com/>
- Con cualquier método de control se logra obtener el valor deseado, el error en estado estacionario es mínimo.
- La comunicación de la planta con la plataforma ThingSpeak se logró realizar por medio del módulo NodeMCU.

- La temperatura máxima de trabajo, por seguridad, se estableció a 70°C para evitar que la tubería PVC se deforme y se presenten filtraciones en la misma.
- Durante las pruebas iniciales no se podía tener una lectura adecuada de la PT100 cuando se accionaba la resistencia de calentamiento, debido a que se presentaba ruido eléctrico en la señal y la medida de temperatura variaba considerablemente. Se pudo evidenciar que se trataba de falta de aterrizaje del tanque donde se encuentra sumergida la resistencia.
- A pesar que la PT100 únicamente genera una variación de resistencia en sus dos hilos, se logró acondicionar la señal para que pudiera ser leída por una de las entradas analógicas del PLC.
- Para evidenciar fotos de funcionamiento de la planta y evidencias de la construcción ver Anexo I.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los tanques de la planta se construyeron en lámina de col roll por ahorro de costos, sin embargo, la mejor opción hubiese sido construir la planta en acero inoxidable, aun así, la planta cumple con su función principal que es almacenar el agua a controlar, aunque su principal desventaja es la oxidación que afecta a los tanques, aunque tengan una capa de pintura electrostática, por efectos de la temperatura esa capa se comienza a debilitar y caer.

La temperatura afecta notablemente la forma y estructura propia de la tubería instalada actualmente, durante la primera prueba realizada la tubería se deformó y comenzó a presentar filtraciones en los puntos de uniones como codos y válvulas debido a que la tubería PVC utilizada tiene como temperatura máxima de trabajo 60°C con picos de hasta 80°C que no excedan más de dos minutos.

Mediante la ayuda de los datos experimentales y las herramientas y Tool Boxes de Matlab, se logró modelar matemáticamente la mayoría de los componentes que intervienen en el control de planta, con estos modelamientos se pudo adaptar mejor el control, adicionalmente, mediante el módulo Simulink se pudo corroborar el funcionamiento teórico con el real.

En caso que no se cuente con los módulos de RTD del PLC Siemens, es necesario realizar la adecuación y acondicionamiento de la señal del sensor, transmisor y PLC para poder realizar las lecturas apropiadas del sensor.

Por tratarse de un volumen de agua considerable y una resistencia no tan grande, el tiempo de respuesta del proceso es bastante lento, esto hace que la acción derivativa sea nula en el proceso, esto se pudo evidenciar en la sintonización del control PID en el *PID Tunning*.

Se configuró la pantalla de supervisión y control HMI KTP600 de manera práctica y sencilla para verificar el funcionamiento de la planta y manipular los valores deseados

Se logró migrar la información de la temperatura de la planta en tiempo real a la plataforma de ThingSpeak y poder visualizar los datos y el comportamiento de la temperatura en una gráfica, del mismo modo también se pudo obtener los datos de la planta en un formato Excel descargándolo desde la misma plataforma para su verificación y tratamiento de datos.

En procesos con respuestas transitorias tan lentas como la de este caso, un simple controlador On-Off basta para suplir la necesidad del control.

Para poder tener visualización de estado de la planta sin interrupciones es necesario disponer de un computador conectado al módulo NodeMCU continuamente para que los datos puedan ser migrados a la nube de ThingSpeak

5.2 Recomendaciones

- Se sugiere adaptar la planta para realizar control de nivel de los tanques para poder evidenciar respuestas más rápidas y así evidenciar de una manera más dinámica el funcionamiento de los controladores.
- Se recomienda no operar la planta por encima de 75°C ya que afecta la integridad de la tubería de recirculación
- Es necesario seguir las indicaciones y recomendaciones de seguridad del manual de uso de la planta como se observa en el Anexo H.
- Es necesario tener siempre una buena y confiable conexión de puesta a tierra tanto del tablero como del tanque a controlar, teniendo en cuenta que se manejan aproximadamente 5 kW de potencia y altas corrientes.
- Sería más conveniente haber trabajado con una resistencia a 208/220 VAC para disminuir el consumo de corriente con la misma resistencia o aumentar la potencia de la misma sin aumentar la corriente de consumo.
- Hubiese sido conveniente haber adquirido los módulos RTD del PLC o los módulos de comunicación para haber tratado directamente la señal de la PT100 y haber migrado los datos de la planta directamente a un servidor local sin necesidad de utilizar elementos adicionales como los transmisores y el módulo NodeMCU.
- Para poder tener visualización de estado de la planta sin interrupciones es necesario disponer de un computador conectado al módulo NodeMCU continuamente para que los datos puedan ser migrados a la nube de ThingSpeak.
- Si se tratara de una aplicación crítica, se recomendaría disponer de una UPS para que alimente en forma continua con tensión AC la alimentación del PLC y la HMI y

que se eviten flasheos o daños a los equipos por fenómenos eléctricos de la red de alimentación.

- Sería conveniente adaptar un sistema de enfriamiento tipo intercambiador de calor para realizar más simulaciones y no esperar a que el agua baje su temperatura hasta la del ambiente.
- Se sugiere instalar un sensor de nivel para verificar el mismo en la pantalla HMI y para evitar que el tanque de control se rebose y genere derrames de agua.
- Aprovechando el uso del módulo NodeMCU podría utilizarse el mismo para generar la base de datos directamente en MySQL mediante un código de programación en PHP por medio de *PHPMysqlAdmin* por medio de esta herramienta se pueden generar páginas web para mostrar y exportar los datos a MySQL.

A. Anexo: Hoja de datos PLC Siemens S7-1200

SIEMENS

Data sheet

6ES7212-1BE40-0XB0

SIMATIC S7-1200, CPU 1212C, COMPACT CPU, AC/DC/RLY,
ONBOARD I/O: 8 DI 24V DC; 6 DO RELAY 2A; 2 AI 0 - 10V DC,
POWER SUPPLY: AC 85 - 264 V AC AT 47 - 63 HZ,
PROGRAM/DATA MEMORY: 75 KB



General information	
Product type designation	CPU 1212C AC/DC/Relay
Firmware version	V4.2
Engineering with	
• Programming package	STEP 7 V14 or higher
Supply voltage	
Rated value (AC)	
• 120 V AC	Yes
• 230 V AC	Yes
permissible range, lower limit (AC)	85 V
permissible range, upper limit (AC)	264 V
Line frequency	
• permissible range, lower limit	47 Hz
• permissible range, upper limit	63 Hz
Input current	
Current consumption (rated value)	80 mA at 120 V AC; 40 mA at 240 V AC
Current consumption, max.	240 mA at 120 V AC; 120 mA at 240 V AC
Inrush current, max.	20 A; at 264 V

B. Anexo: Hoja de datos HMI Siemens KTP600 Basic mono PN

SIEMENS

Data sheet

6AV6647-0AB11-3AX0

SIMATIC HMI KTP600 Basic mono PN, Basic Panel, Key/touch operation, 6" STN display, 4 gray levels, PROFINET interface, configurable as of WinCC flexible 2008 SP2 Compact/ WinCC Basic V10.5/ STEP 7 Basic V10.5, contains open-source software, which is provided free of charge see enclosed CD



General information	
Product type designation	KTP600 Basic mono PN
Display	
Design of display	STN
Screen diagonal	5.7 in
Display width	115.2 mm
Display height	86.4 mm
Number of colors	4; Grayscale
Resolution (pixels)	
• Horizontal image resolution	320 Pixel
• Vertical image resolution	240 Pixel
Backlighting	
• MTBF backlighting (at 25 °C)	50 000 h
• Backlight dimmable	No
Control elements	
Keyboard fonts	
• Function keys	
— Number of function keys	6

C. Anexo C: Hoja de datos detector de temperatura PT100



Tablas de termocuplas y Pt100

Como usar las tablas		Pag. 1
Termocupla	J	Pag. 2
Termocupla	K	Pag. 3
Termocupla	T	Pag. 6
Termocupla	R	Pag. 7
Termocupla	S	Pag. 10
Termocupla	B	Pag. 13
Pt 100		Pag. 15

D. Anexo D: Hoja de datos electrobomba I Water QB60



QB Series

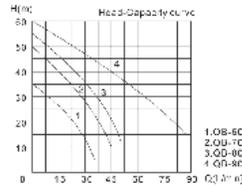
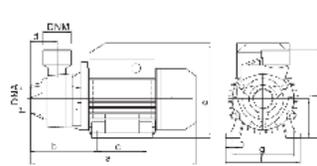
ELECTRIC CLEAN WATER PUMP

QB series clean water pumps are high efficient household electric pumps, with the miniature heavy-duty electric motor and the peripheral pump couple directly. They have the advantages of simple construction, small measurement, light weight, higher head, easy operation and maintenance. They do well in carrying clean water or the liquid whose physical and chemical nature similar to clean water, not exceeding 40°C. They are ideal for household well water pumping, water injection supplying, car washing, and garden watering etc.



CONSTRUCTION:
 PUMP: Peripheral
 Pump Body: Cast Iron
 Impeller: Bronze
 Mechanical Seal: Carbon / Ceramic / Stainless Steel
 Front cover: Cast Iron / Aluminium with Brass Insert
MOTOR: Single Phase Heavy Duty Continuous Work
 Motor Housing: Aluminium
 Shaft: Carbon Steel / Stainless Steel
 Insulation: Class B / Class F
 Protection: IP44 / IP54
 Construction: Full Wound Induction

DB-750A



OVERALL & INSTALLATION DIMENSIONS

Model	DIMENSIONS (mm)														
	DNA	DNM	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
QB-60	1"	1"	265	110	80	45	151	118	100	10	63	138	-	-	-
QB-70	1"	1"	305	122	90	50	181	136	112	10	71	150	-	-	-
QB-80	1.5"	1.5"	305	122	90	50	181	136	112	10	71	150	-	-	-
QB-90	1.5"	1.5"	380	138	100	68	182	180	162	10	80	156	-	-	-

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Model	Power		Q max.		max. Suct. m	max. Speed	Inlet/Outlet	mm	PACKAGE DIMENSIONS & G.W.			
	HP	KW	l/min	m					A	B	H	kg
QB-60	0.5	0.37	35	35	9	2850	25x25	285	145	175	6.3	
QB-70	0.75	0.55	45	50								
QB-80	1	0.75	50	55								
QB-90	1.5	1.1	90	60								



* 110V, 110V/220V, 60Hz etc. models are available on request.

E. Anexo E: Código almacenamiento datos ThingSpeak

```
#include <ESP8266WiFi.h>

char ssid[] = "Redmi Note 9S"; // Nombre de la Red WiFi
PQSWIFIAP MEDINA Redmi Note 9S
char pass[] = "andres1234"; // Contraseña de WiFi
P91Q89S79S85A 1121889495 andres1234
int keyIndex = 0; // your network key Index number
(needed only for WEP)
WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = 1122175; // Id del
canal de ThingSpeak
const char * myWriteAPIKey = "2SSHR4H2OF05CK3U"; //API Key
de escritura en ThingSpeak

float number = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Initialize serial

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak
}

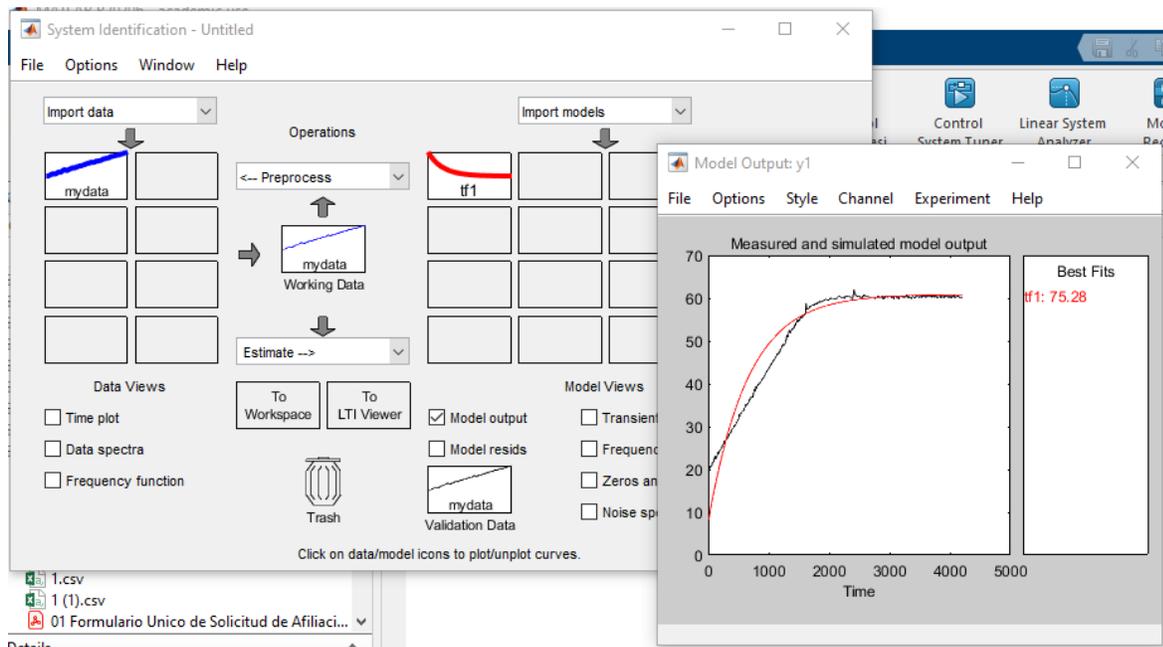
void loop() {

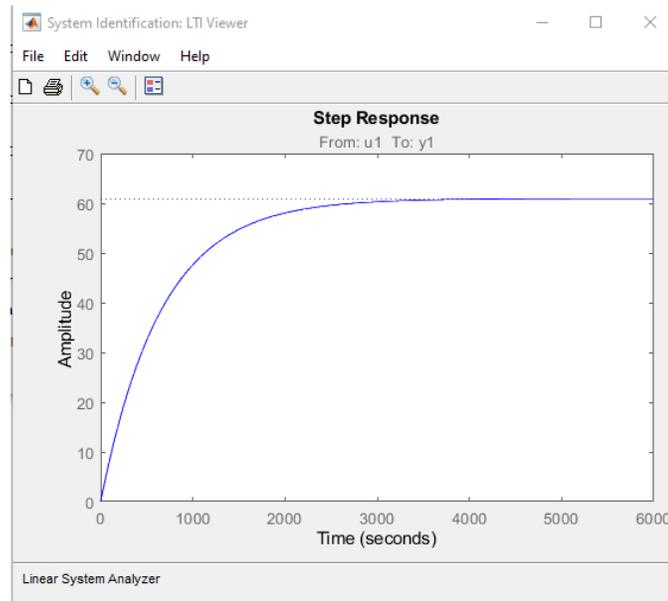
  // Connect or reconnect to WiFi
  if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
    Serial.println(SECRET_SSID);
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
      WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2
network. Change this line if using open or WEP network
      Serial.print(".");
      delay(5000);
    }
    Serial.println("\nConnected.");
  }

  // Write to ThingSpeak. There are up to 8 fields in a
channel, allowing you to store up to 8 different
```

F. Anexo F: Diseños de Control PI - PID

Con los datos obtenidos en las pruebas experimentales y como se comentó en el capítulo 3, se ingresaron dichos datos al *System Identification* de Matlab para que se estimara una función de transferencia de la planta, del mismo modo se utilizó la App de Matlab *PID Tuner* para corroborar la función de transferencia óptima de la planta y adicionalmente determinar las constantes proporcional, integral y derivativa del sistema. Las siguientes imágenes muestran el proceso de identificación de la planta a partir de los datos experimentales y las configuraciones de las ganancias de los controladores.





Data/model Info: tf1

Model name:

Color:

From input "u1" to output "y1":
 0.09281

 s + 0.001523
 Name: tf1
 Continuous-time identified transfer function.

Diary and Notes

```

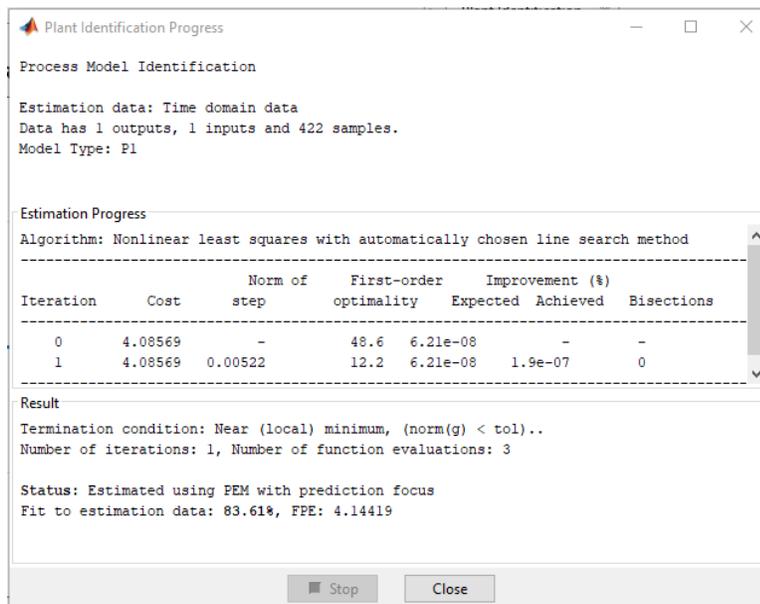
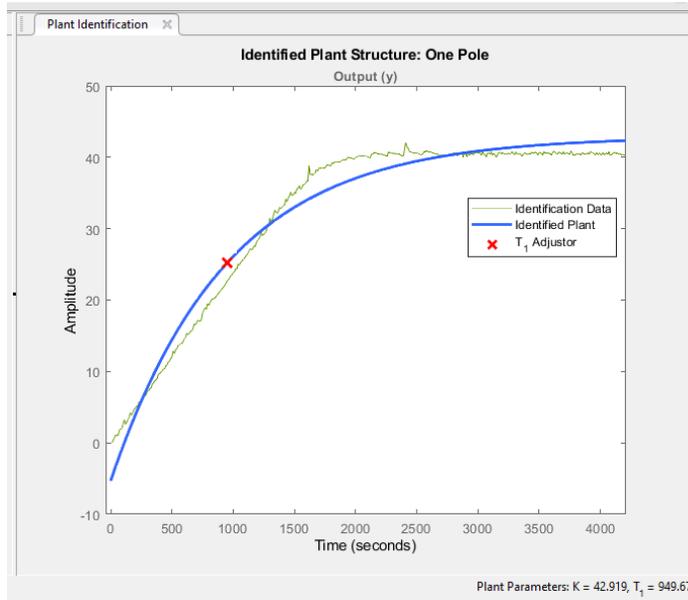
% Import mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.Display = 'on';
Options.WeightingFilter = [];
Options.InitialCondition = 'zero';

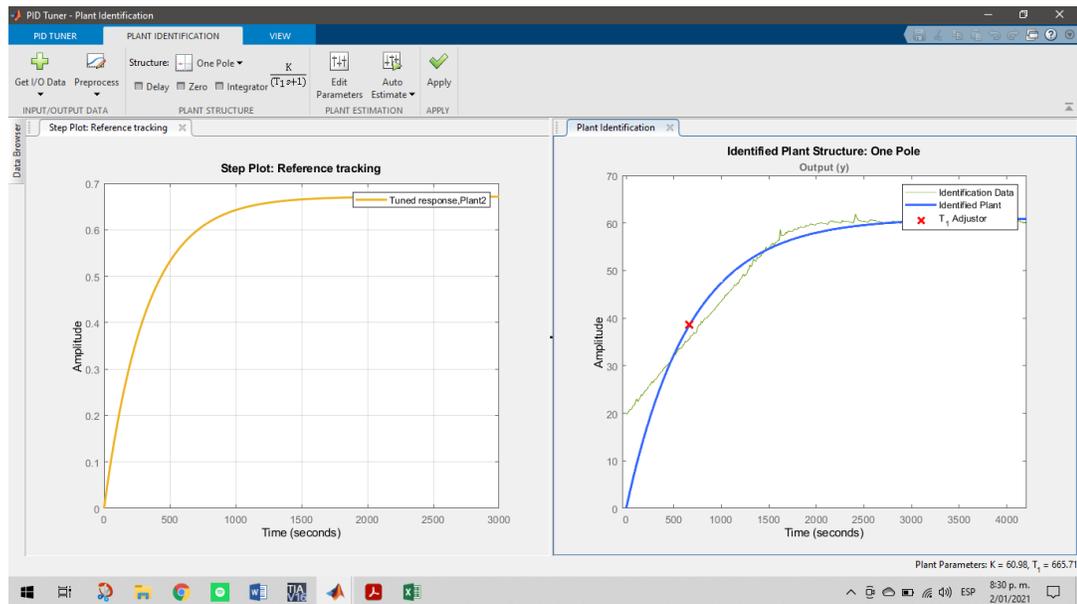
tf1 = tfest(mydata, 1, 0, Options);
    
```

Show in LTI Viewer

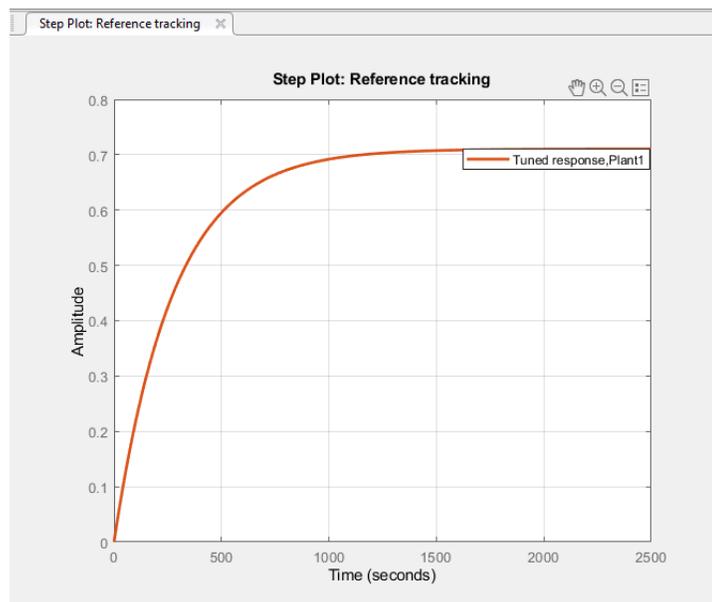
Present Export Close Help



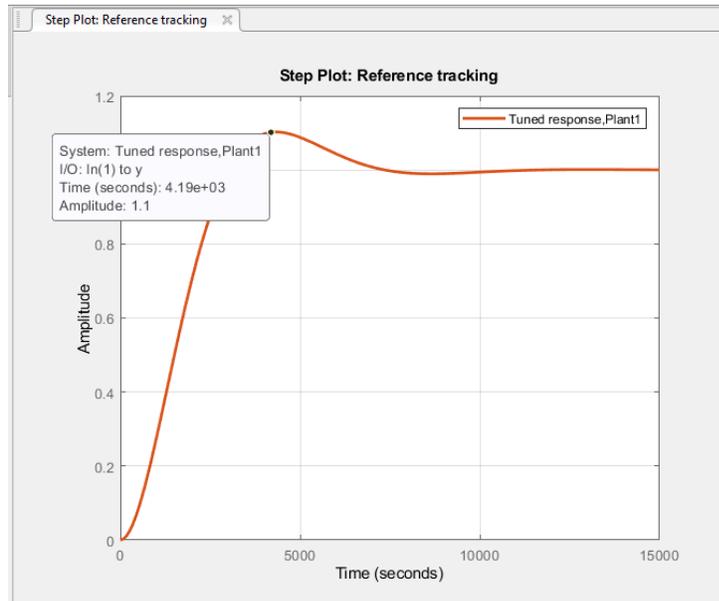
Valores estimados por Matlab para el control proporcional:



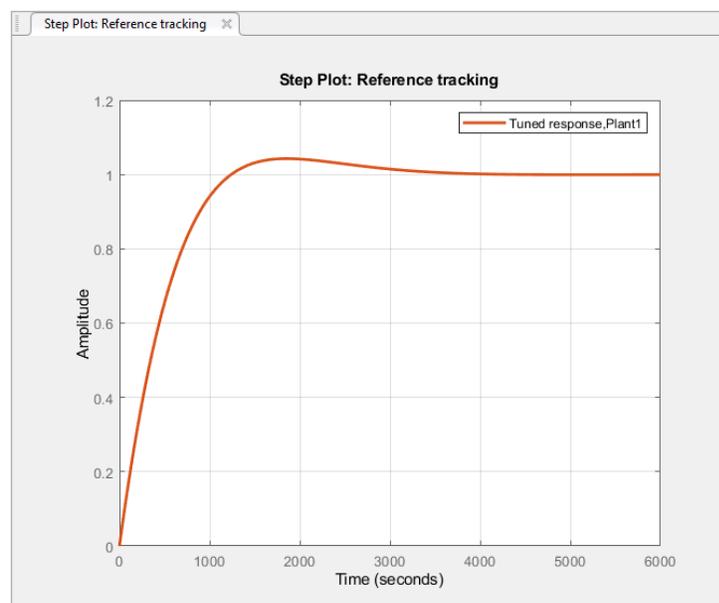
Ganancia calculada por Matlab para control proporcional: $K_p = 0.0572$



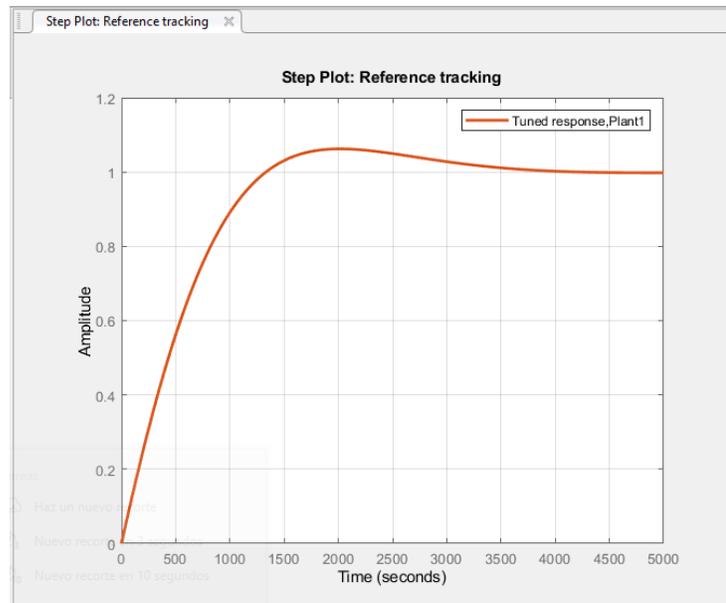
Ganancia calculada por Matlab para control integral: $K_p = 1.78e-05$



Ganancias calculadas por Matlab para control proporcional-integral: $K_p = 0.0398$, $K_i = 6.59e-05$



Ganancias calculadas por Matlab para control PID: $K_p = 0.0292$, $K_i = 5.73e-05$



Se evidencia la ausencia de tiempo derivativo debido a la respuesta tan lenta del sistema.

G. Anexo G: Archivo Excel pruebas Extech

Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit
1	22/12/2020	9:43:28	019.8	T1 KTemp C	019.8	T2 KTemp C	019.8	T3 KTemp C	019.8	T4 KTemp C
2	22/12/2020	9:43:36	020.1	T1 KTemp C	019.9	T2 KTemp C	020.7	T3 KTemp C	020.1	T4 KTemp C
3	22/12/2020	9:43:46	020.5	T1 KTemp C	020.2	T2 KTemp C	021.1	T3 KTemp C	020.2	T4 KTemp C
4	22/12/2020	9:43:58	020.6	T1 KTemp C	020.4	T2 KTemp C	021.6	T3 KTemp C	021.0	T4 KTemp C
5	22/12/2020	9:44:08	021.0	T1 KTemp C	020.5	T2 KTemp C	021.1	T3 KTemp C	020.6	T4 KTemp C
6	22/12/2020	9:44:18	021.0	T1 KTemp C	020.8	T2 KTemp C	021.0	T3 KTemp C	020.8	T4 KTemp C
7	22/12/2020	9:44:28	021.2	T1 KTemp C	021.0	T2 KTemp C	022.5	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
8	22/12/2020	9:44:38	021.5	T1 KTemp C	021.3	T2 KTemp C	022.5	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
9	22/12/2020	9:44:48	021.8	T1 KTemp C	021.7	T2 KTemp C	022.0	T3 KTemp C	021.6	T4 KTemp C
10	22/12/2020	9:44:58	021.9	T1 KTemp C	021.9	T2 KTemp C	022.1	T3 KTemp C	023.9	T4 KTemp C
11	22/12/2020	9:45:08	023.0	T1 KTemp C	021.9	T2 KTemp C	024.1	T3 KTemp C	023.2	T4 KTemp C
12	22/12/2020	9:45:18	022.5	T1 KTemp C	022.3	T2 KTemp C	022.6	T3 KTemp C	022.5	T4 KTemp C
13	22/12/2020	9:45:28	022.8	T1 KTemp C	022.6	T2 KTemp C	022.7	T3 KTemp C	022.4	T4 KTemp C
14	22/12/2020	9:45:38	022.9	T1 KTemp C	022.7	T2 KTemp C	023.0	T3 KTemp C	023.9	T4 KTemp C
15	22/12/2020	9:45:48	023.1	T1 KTemp C	023.0	T2 KTemp C	024.5	T3 KTemp C	023.1	T4 KTemp C
16	22/12/2020	9:45:58	023.5	T1 KTemp C	023.2	T2 KTemp C	024.4	T3 KTemp C	025.7	T4 KTemp C
17	22/12/2020	9:46:08	023.7	T1 KTemp C	023.6	T2 KTemp C	023.5	T3 KTemp C	024.0	T4 KTemp C
18	22/12/2020	9:46:18	023.9	T1 KTemp C	023.8	T2 KTemp C	024.3	T3 KTemp C	024.0	T4 KTemp C
19	22/12/2020	9:46:28	024.7	T1 KTemp C	024.0	T2 KTemp C	024.6	T3 KTemp C	024.7	T4 KTemp C
20	22/12/2020	9:46:38	024.4	T1 KTemp C	024.3	T2 KTemp C	024.5	T3 KTemp C	025.6	T4 KTemp C
21	22/12/2020	9:46:48	024.7	T1 KTemp C	024.5	T2 KTemp C	025.3	T3 KTemp C	024.9	T4 KTemp C
22	22/12/2020	9:46:58	025.0	T1 KTemp C	024.8	T2 KTemp C	025.0	T3 KTemp C	025.3	T4 KTemp C
23	22/12/2020	9:47:08	025.3	T1 KTemp C	025.5	T2 KTemp C	026.0	T3 KTemp C	025.1	T4 KTemp C
24	22/12/2020	9:47:18	025.5	T1 KTemp C	025.1	T2 KTemp C	026.0	T3 KTemp C	026.0	T4 KTemp C
25	22/12/2020	9:47:28	025.7	T1 KTemp C	025.4	T2 KTemp C	027.3	T3 KTemp C	025.6	T4 KTemp C
26	22/12/2020	9:47:38	025.9	T1 KTemp C	025.8	T2 KTemp C	026.1	T3 KTemp C	026.8	T4 KTemp C
27	22/12/2020	9:47:48	026.2	T1 KTemp C	026.0	T2 KTemp C	028.3	T3 KTemp C	026.4	T4 KTemp C
28	22/12/2020	9:47:58	026.3	T1 KTemp C	026.1	T2 KTemp C	026.5	T3 KTemp C	026.6	T4 KTemp C
29	22/12/2020	9:48:08	026.4	T1 KTemp C	026.5	T2 KTemp C	027.3	T3 KTemp C	026.4	T4 KTemp C
30	22/12/2020	9:48:18	027.0	T1 KTemp C	026.7	T2 KTemp C	028.0	T3 KTemp C	026.9	T4 KTemp C
31	22/12/2020	9:48:28	027.1	T1 KTemp C	027.0	T2 KTemp C	027.0	T3 KTemp C	027.1	T4 KTemp C
32	22/12/2020	9:48:38	027.3	T1 KTemp C	027.3	T2 KTemp C	027.4	T3 KTemp C	027.5	T4 KTemp C
33	22/12/2020	9:48:48	027.5	T1 KTemp C	027.4	T2 KTemp C	027.8	T3 KTemp C	027.5	T4 KTemp C
34	22/12/2020	9:48:58	027.8	T1 KTemp C	027.8	T2 KTemp C	028.6	T3 KTemp C	028.0	T4 KTemp C
35	22/12/2020	9:49:08	028.0	T1 KTemp C	027.9	T2 KTemp C	029.1	T3 KTemp C	027.9	T4 KTemp C
36	22/12/2020	9:49:18	028.4	T1 KTemp C	028.2	T2 KTemp C	028.3	T3 KTemp C	029.1	T4 KTemp C
37	22/12/2020	9:49:28	028.7	T1 KTemp C	028.4	T2 KTemp C	028.5	T3 KTemp C	028.9	T4 KTemp C
38	22/12/2020	9:49:38	028.8	T1 KTemp C	028.7	T2 KTemp C	029.3	T3 KTemp C	028.7	T4 KTemp C
39	22/12/2020	9:49:48	029.1	T1 KTemp C	028.8	T2 KTemp C	030.9	T3 KTemp C	028.9	T4 KTemp C
40	22/12/2020	9:49:58	029.3	T1 KTemp C	029.2	T2 KTemp C	030.0	T3 KTemp C	029.5	T4 KTemp C
41	22/12/2020	9:50:08	029.7	T1 KTemp C	029.5	T2 KTemp C	029.5	T3 KTemp C	030.2	T4 KTemp C
42	22/12/2020	9:50:18	029.9	T1 KTemp C	029.7	T2 KTemp C	030.2	T3 KTemp C	029.8	T4 KTemp C
43	22/12/2020	9:50:28	029.8	T1 KTemp C	029.8	T2 KTemp C	030.3	T3 KTemp C	030.7	T4 KTemp C
44	22/12/2020	9:50:38	030.1	T1 KTemp C	030.1	T2 KTemp C	030.4	T3 KTemp C	030.1	T4 KTemp C
45	22/12/2020	9:50:48	030.6	T1 KTemp C	030.3	T2 KTemp C	031.0	T3 KTemp C	030.4	T4 KTemp C
46	22/12/2020	9:50:58	030.6	T1 KTemp C	030.7	T2 KTemp C	031.1	T3 KTemp C	030.6	T4 KTemp C
47	22/12/2020	9:51:08	031.0	T1 KTemp C	030.9	T2 KTemp C	031.0	T3 KTemp C	031.5	T4 KTemp C
48	22/12/2020	9:51:18	031.0	T1 KTemp C	031.1	T2 KTemp C	032.0	T3 KTemp C	031.0	T4 KTemp C
49	22/12/2020	9:51:28	031.4	T1 KTemp C	031.4	T2 KTemp C	031.6	T3 KTemp C	032.0	T4 KTemp C
50	22/12/2020	9:51:38	031.8	T1 KTemp C	031.6	T2 KTemp C	031.7	T3 KTemp C	032.2	T4 KTemp C
51	22/12/2020	9:51:48	032.1	T1 KTemp C	031.8	T2 KTemp C	032.9	T3 KTemp C	033.9	T4 KTemp C
52	22/12/2020	9:51:58	032.1	T1 KTemp C	032.3	T2 KTemp C	032.5	T3 KTemp C	032.2	T4 KTemp C
53	22/12/2020	9:52:08	032.4	T1 KTemp C	032.3	T2 KTemp C	034.6	T3 KTemp C	032.3	T4 KTemp C
54	22/12/2020	9:52:18	032.6	T1 KTemp C	032.7	T2 KTemp C	033.9	T3 KTemp C	032.6	T4 KTemp C
55	22/12/2020	9:52:28	032.9	T1 KTemp C	032.8	T2 KTemp C	035.1	T3 KTemp C	033.2	T4 KTemp C
56	22/12/2020	9:52:38	033.2	T1 KTemp C	033.1	T2 KTemp C	034.4	T3 KTemp C	033.2	T4 KTemp C
57	22/12/2020	9:52:48	033.3	T1 KTemp C	033.3	T2 KTemp C	034.3	T3 KTemp C	033.8	T4 KTemp C
58	22/12/2020	9:52:58	033.7	T1 KTemp C	033.5	T2 KTemp C	034.0	T3 KTemp C	033.6	T4 KTemp C
59	22/12/2020	9:53:08	033.9	T1 KTemp C	033.8	T2 KTemp C	034.1	T3 KTemp C	033.9	T4 KTemp C
60	22/12/2020	9:53:18	034.2	T1 KTemp C	033.9	T2 KTemp C	034.6	T3 KTemp C	034.6	T4 KTemp C
61	22/12/2020	9:53:28	034.2	T1 KTemp C	034.3	T2 KTemp C	035.4	T3 KTemp C	034.4	T4 KTemp C
62	22/12/2020	9:53:38	034.5	T1 KTemp C	034.5	T2 KTemp C	036.9	T3 KTemp C	034.7	T4 KTemp C
63	22/12/2020	9:53:48	034.8	T1 KTemp C	034.8	T2 KTemp C	035.6	T3 KTemp C	034.8	T4 KTemp C
64	22/12/2020	9:53:58	034.9	T1 KTemp C	035.0	T2 KTemp C	035.4	T3 KTemp C	035.0	T4 KTemp C
65	22/12/2020	9:54:08	035.3	T1 KTemp C	035.1	T2 KTemp C	035.9	T3 KTemp C	035.1	T4 KTemp C
66	22/12/2020	9:54:18	035.5	T1 KTemp C	035.3	T2 KTemp C	035.6	T3 KTemp C	035.7	T4 KTemp C
67	22/12/2020	9:54:28	035.6	T1 KTemp C	035.5	T2 KTemp C	036.2	T3 KTemp C	035.7	T4 KTemp C
68	22/12/2020	9:54:38	035.9	T1 KTemp C	035.8	T2 KTemp C	037.8	T3 KTemp C	036.0	T4 KTemp C
69	22/12/2020	9:54:48	036.1	T1 KTemp C	036.0	T2 KTemp C	037.3	T3 KTemp C	035.8	T4 KTemp C

H. Anexo H: Manual de uso de la planta

Para un correcto funcionamiento de la planta, realizar pruebas y evitar daños a las personas y los equipos se recomienda seguir las recomendaciones y el paso a paso de la manipulación segura de la planta que se muestra a continuación.

Se asume que la planta ya se encuentra conectada correctamente a una tensión de 110-120 VAC, 1 fase, 1 neutro, 1 tierra. Los calibres de los conductores deben ser mínimo calibre No. 8 AWG para resistir la corriente que circula a través de ellos y el totalizador de la acometida debe ser un interruptor termo magnético de mínimo 55 A de capacidad de corriente nominal. Todos los componentes metálicos de la planta deben estar debidamente aterrizados a tierra con una conexión sólida. Todas las conexiones internas deben estar debidamente torqueadas. Los tanques deben tener agua en su interior, el tanque de control donde se encuentra alojada la resistencia debe tener un volumen mínimo de 45 litros que corresponden a una altura del nivel de aproximadamente 36 cm desde el fondo del tanque hacia la superficie.

1. Energizar el totalizador de alimentación principal de tensión de la planta
2. Energizar (subir) los mini breakers “FR”, “FA” y “FD” que se muestran dentro del círculo rojo en la izquierda de la figura que se muestra en la siguiente página:



3. Esperar a que inicie la pantalla HMI y el PLC.
4. Poner el selector de tres posiciones en modo manual como lo indica la flecha amarilla de la imagen que se muestra a continuación.



5. Oprimir la pantalla suavemente en el segundo icono de izquierda a derecha  para ingresar a la pantalla de visualización de la planta.
6. En esta pantalla encender se puede verificar el valor de la temperatura actual en la planta, encender la electrobomba y resistencia de calentamiento de modo manual. Para encender la electrobomba se deben alinear correctamente las válvulas de cada tanque si se quiere trasvasar agua de un tanque a otro o si se desea recircular uno de los tanques. Si se encienden estos elementos no descuidar el estado de los tanques para evitar que la resistencia quede descubierta de agua y que no se reboosen los tanques. Verificar constantemente la temperatura en la pantalla para evitar que supere los 75°C.
7. Para operar la planta en modo automático girar el selector de 3 posiciones en sentido horario a la posición “auto”.
8. Seleccionar el tipo de control que se quiere operar por medio de los íconos de la pantalla HMI, para Control On-Off o Control PID.
9. Para tipo de control On-Off, seleccionar el cuarto ícono de izquierda a derecha  hasta que aparezca la pantalla que se muestra a continuación.

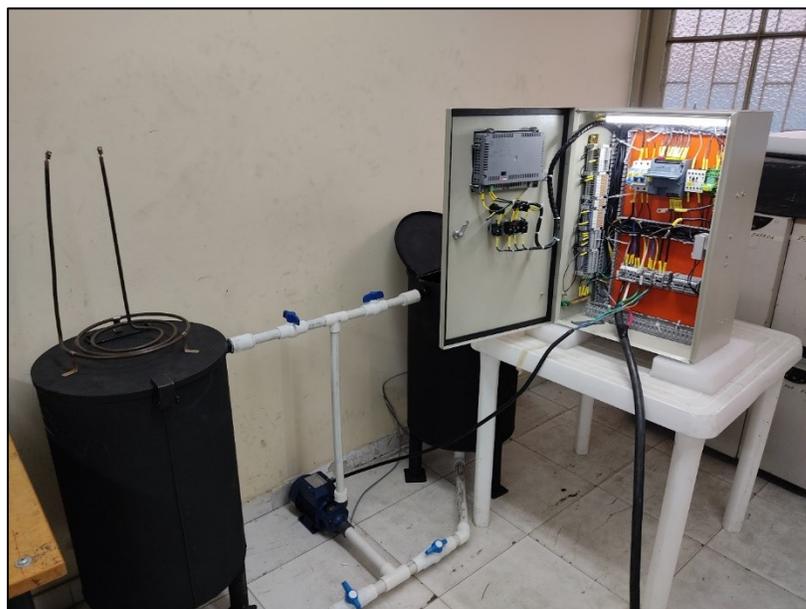


10. Establecer el valor de la temperatura deseada de la planta en el ícono SP por medio del teclado numérico de la pantalla. Si se desea cambiar el valor de la ventana o rango +/- de temperatura, oprimir suavemente cualquiera de los iconos “ventana” y agregar el valor deseado. Cuando la resistencia esté activa, el ícono circulara “salida” se pondrá en color blanco.
11. Para seleccionar el modo PID, oprimir el ícono PID  y establecer los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa en los íconos correspondientes (P, Ti, Td) respectivamente a cada ganancia como se muestra en la figura.



12. Para apagar los controles dejar el selector de tres posiciones en modo off, (posición central) y esperar que la temperatura de los tanques retorne a la del ambiente.
13. Se recomienda intercomunicar los tanques abriendo las dos llaves inferiores.

I. Anexo I: Evidencias construcción y funcionamiento de proyecto



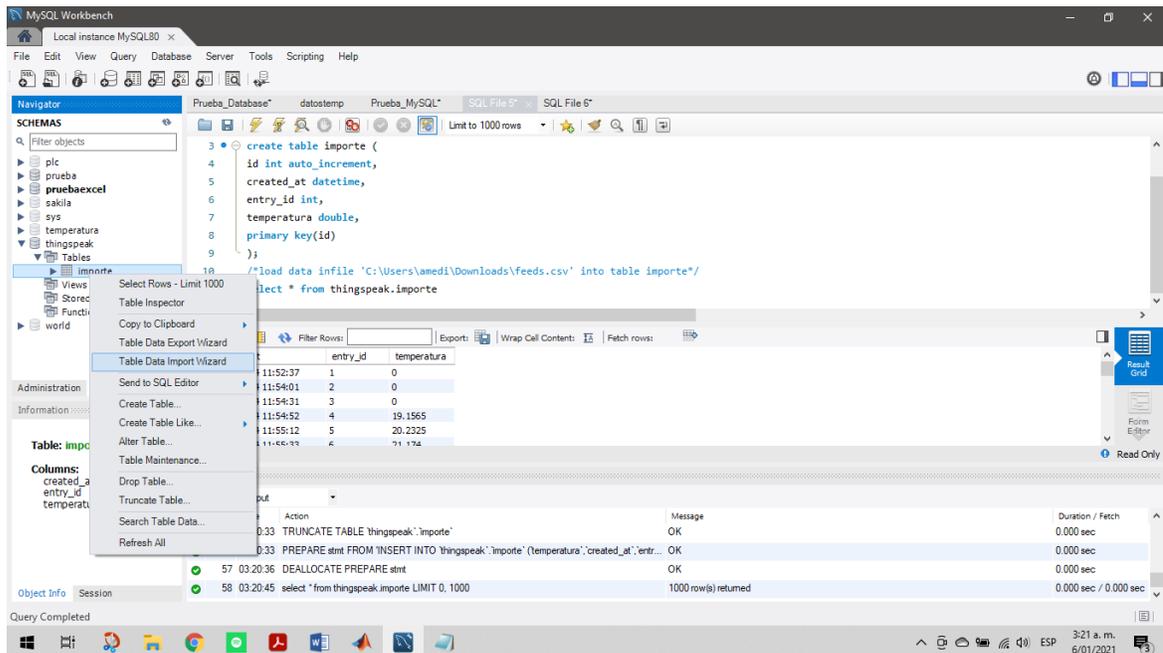


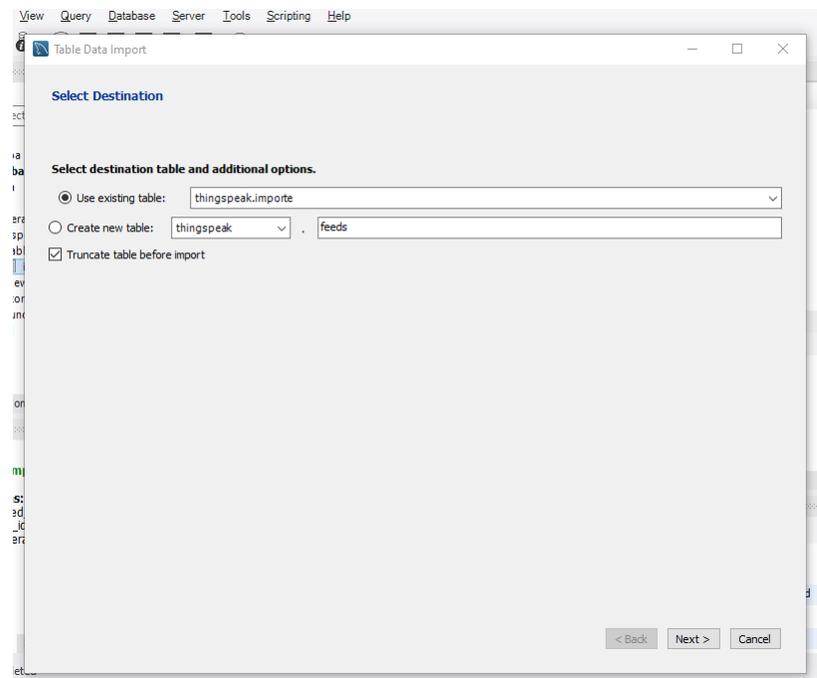
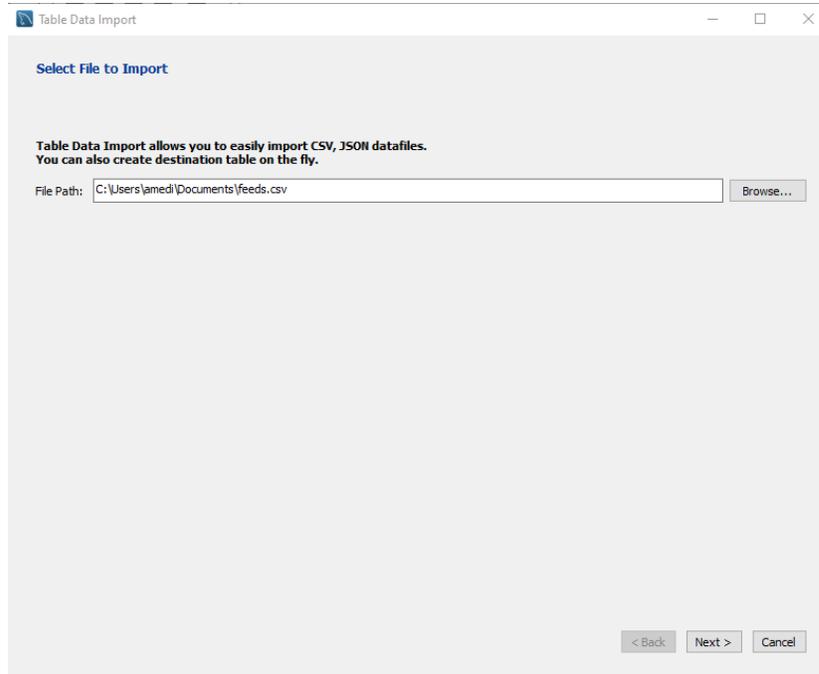


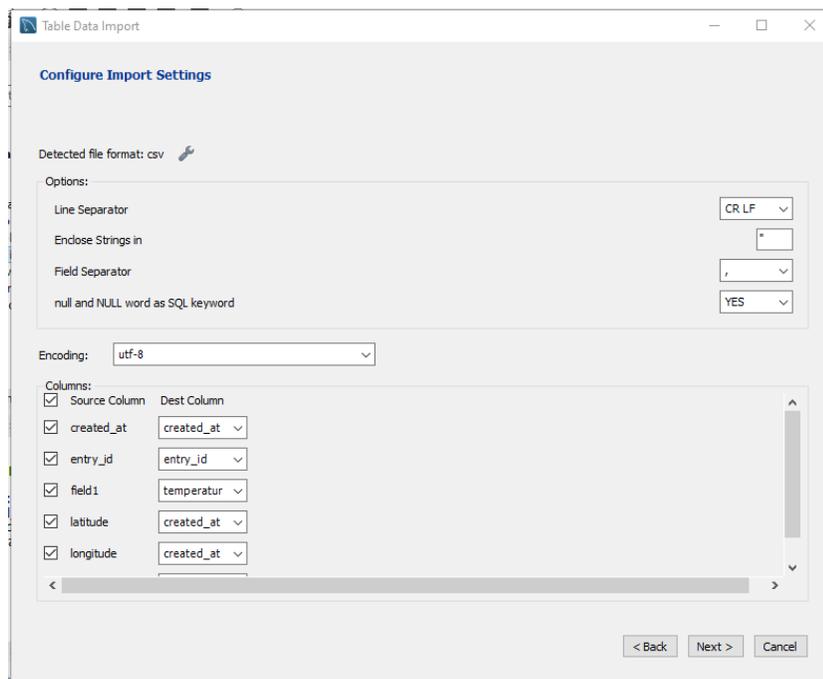
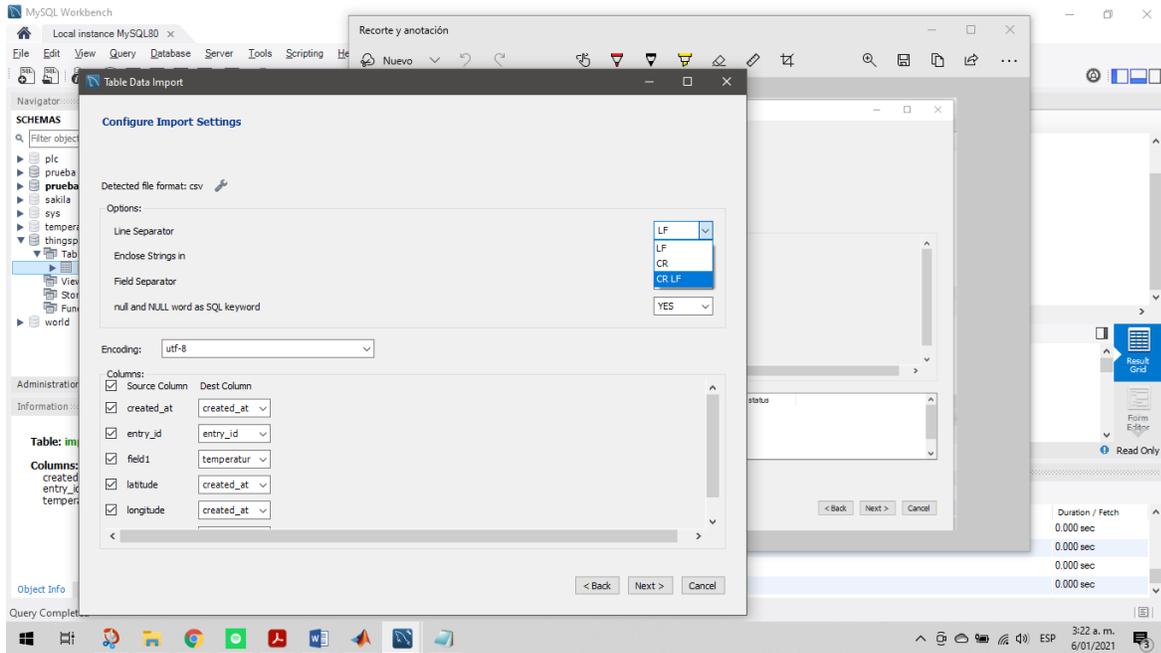


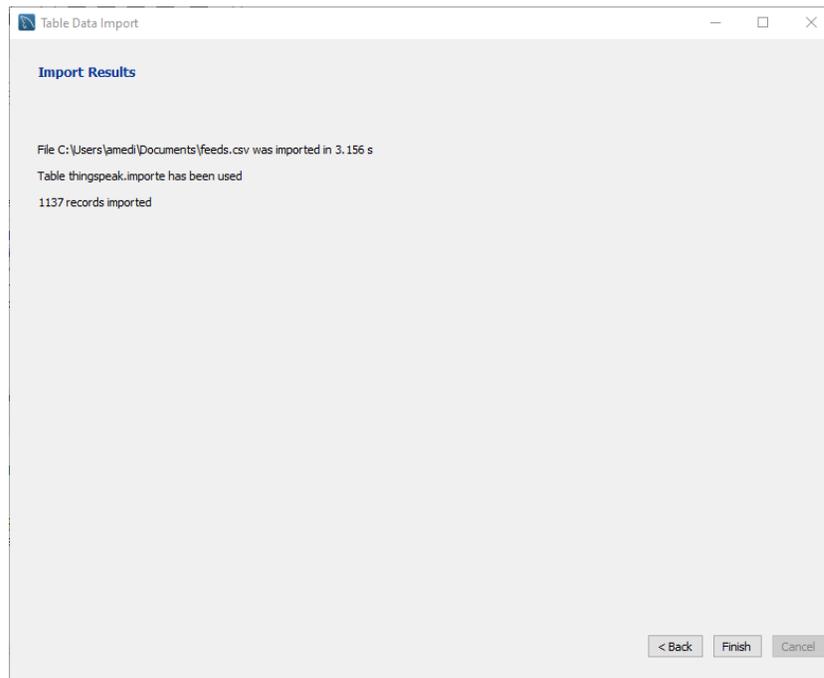
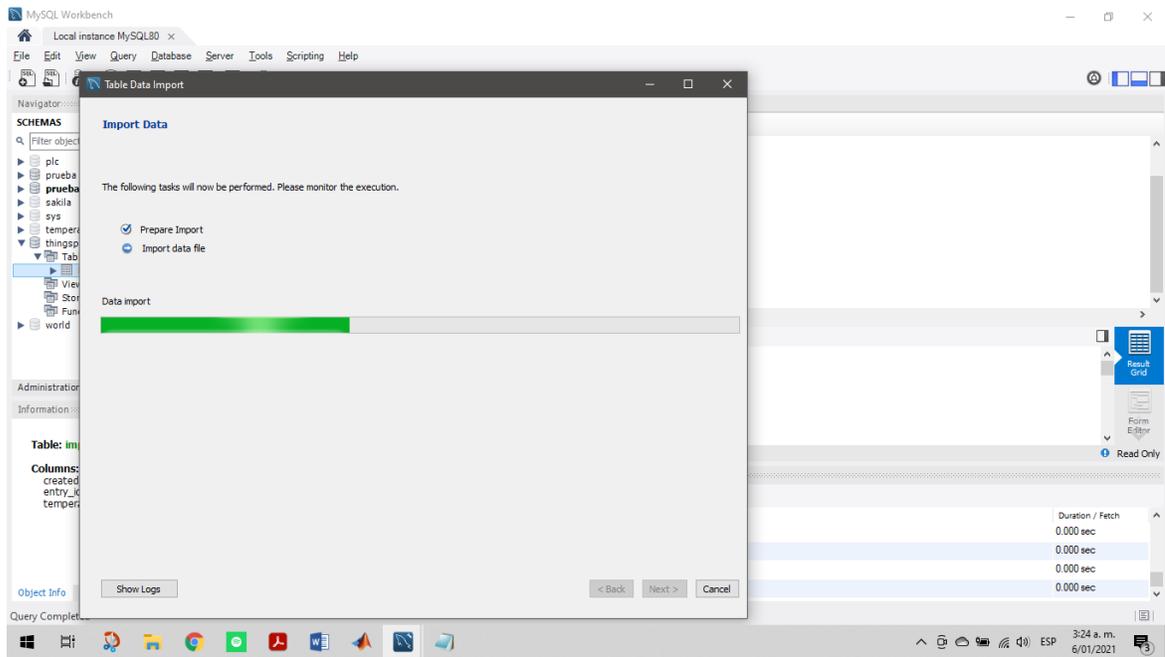
J. Anexo J: Base de datos en MySQL Workbench

Las siguientes imágenes muestran los pasos para la creación de la base de datos e importe de datos de ThingSpeak a MySQL.

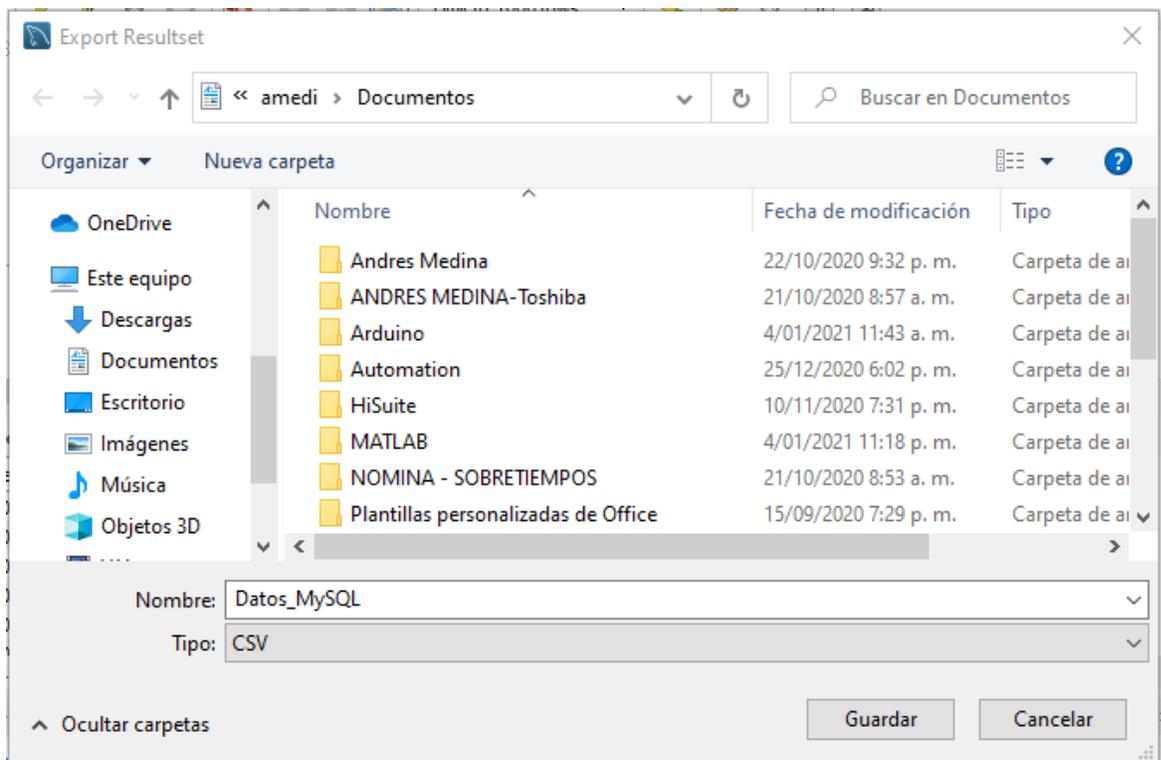
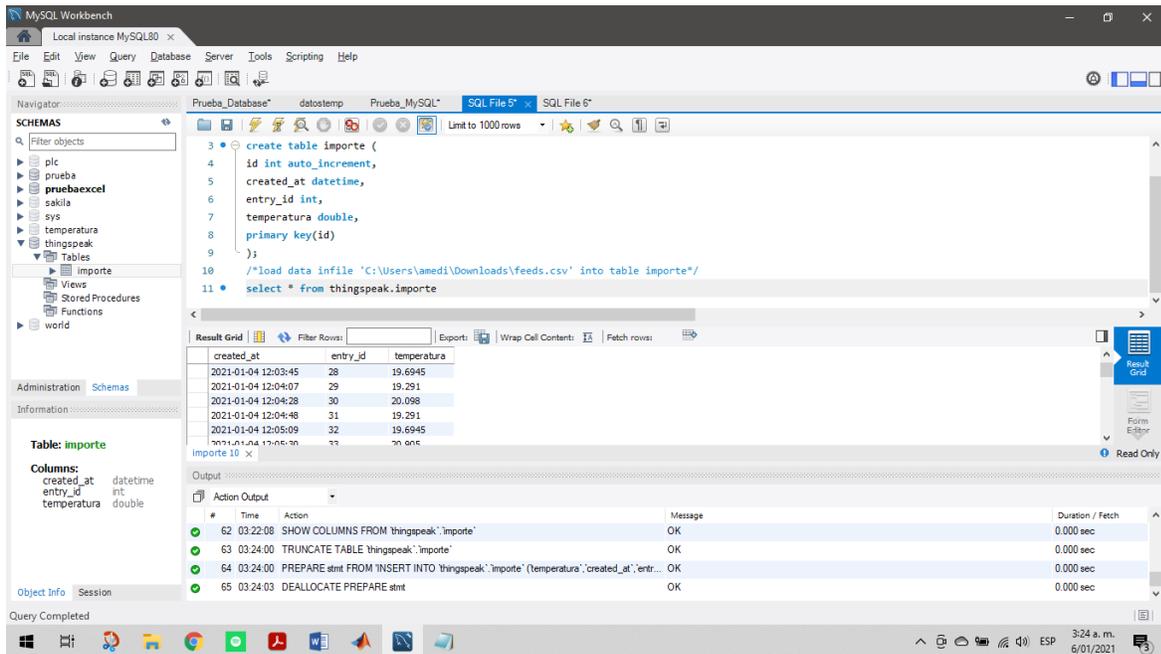








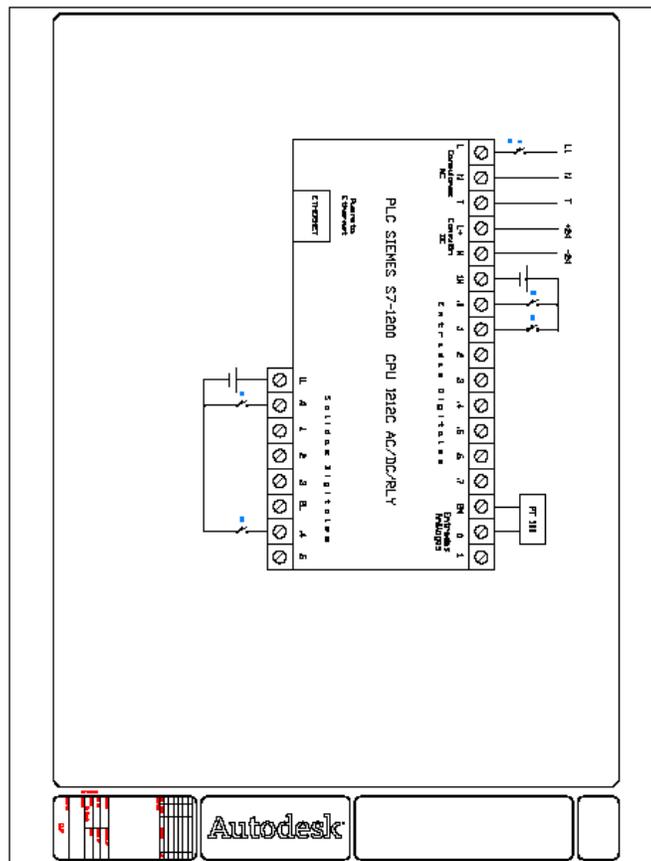
102 Diseño y construcción de un banco interactivo tipo industrial para implementar varias estrategias de control de temperatura mediante un PLC y adquisición de datos mediante ThingSpeak y MySQL



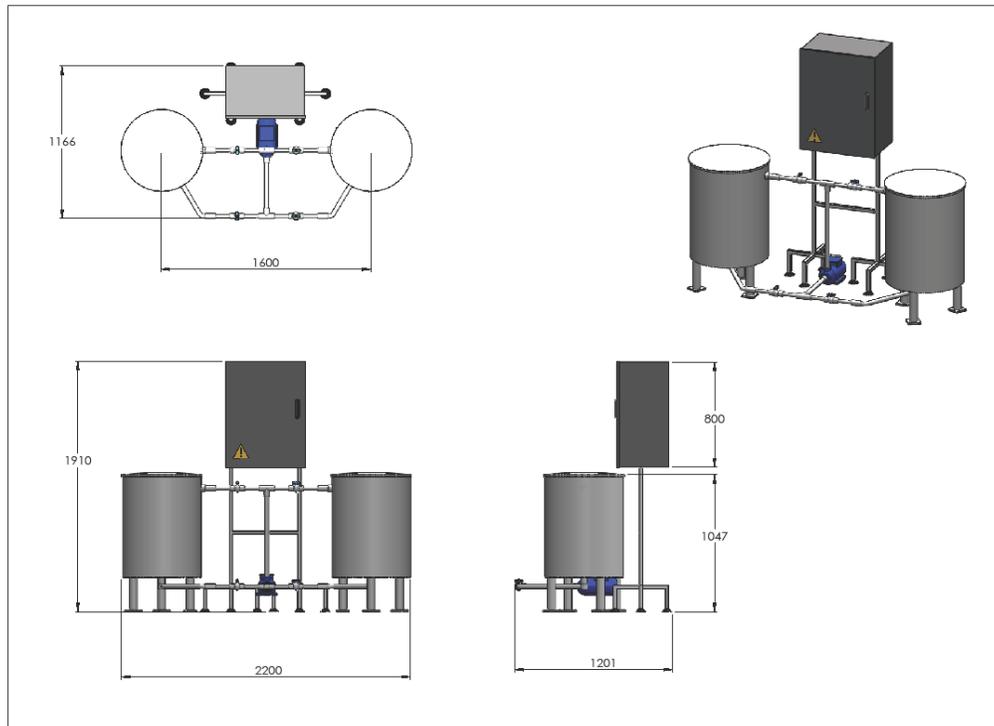
K. Programa del PLC

Totally Integrated Automation Portal			
PLC_Control_temp [CPU 1212C AC/DC/Rly]			
PLC_Control_temp			
General Información del proyecto			
Nombre	PLC_Control_temp	Autor	Andres Medina
Comentario		Slot	1
Rack	0		
General Información de catálogo			
Descripción abreviada	CPU 1212C AC/DC/Rly	Descripción	Memoria de trabajo 75KB; fuente de alimentación 120/240V AC con DIB x 24V DC SINK/SOURCE, DQ6 x relé y AI2 integradas; 4 contadores rápidos (ampliables con Signal Board digital) y 4 salidas de impulso integradas; Signal Board amplia E/S integradas; hasta 3 módulos de comunicaciones para comunicación serie; hasta 2 módulos de señales para ampliación E/S; interfaz PROFINET para programación, HMI y comunicación PLC-PLC
Referencia	6ES7 212-1BE40-0XB0	Versión de firmware	V4.2
General Identification & Maintenance			
ID de la instalación		ID de situación	
Fecha de instalación	2020-12-18 10:59:59.919	Información adicional	
General Sumas de verificación			
Listas de textos	FA 70 E8 75 1D 5A 8E 29	Software	D8 61 8A E7 28 28 4A 78
Interfaz PROFINET [X1] General			
Nombre	PROFINET interface_1	Autor	Andres Medina
Comentario			
Interfaz PROFINET [X1] General Información del proyecto			
Nombre	DI 8/DQ 6_1	Comentario	
Nombre	AI 2_1	Comentario	
Interfaz PROFINET [X1] Direcciones Ethernet Interfaz conectada en red con			
Subred:	PNIE_1		
Interfaz PROFINET [X1] Direcciones Ethernet Protocolo IP			
Configuración IP	Ajustar dirección IP en el proyecto	Dirección IP:	192.168.0.10
Máscara de subred:	255.255.255.0	Utilizar router	False
Interfaz PROFINET [X1] Direcciones Ethernet PROFINET			
Permitir ajustar el nombre de dispositivo PROFINET directamente en el dispositivo	False	Generar automáticamente el nombre del dispositivo PROFINET	True
Nombre del dispositivo PROFINET:	plc_control_temp	Nombre convertido:	plcxccontrolxbtemp985e
Número de dispositivo:	0		
Interfaz PROFINET [X1] Sincronización horaria			
Activar sincronización horaria vía servidor NTP	Activar sincronización horaria vía servidor NTP		Direcciones IP
Servidor 1	0.0.0.0	Servidor 2	0.0.0.0
Servidor 3	0.0.0.0	Servidor 4	0.0.0.0

M. Planos de conexiones del PLC



N. Planos de construcción de planta



6 Bibliografía

- Abdul-Rahman, A., & Graves, C. (2016). Internet of Things Application Using Tethered MSP430 to Thingspeak Cloud. *2016 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, (págs. 352-357). Oxford. doi:10.1109/SOSE.2016.42
- Åström, K. J., & Häggglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning* (Segunda ed.). Carolina del Norte: Instrument Society of America.
- Cano Padrón, M. T., Cárdenas Carballo, J. F., Aparicio Marroquín, A., López Molina, M. G., & Santos Hernandez, M. A. (Noviembre de 2018). Desarrollo de un Controlador Lógico Programable (PLC) para aplicaciones universales aplicando innovación frugal con un enfoque en PYMES y sector doméstico. Puebla, México. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11777/4112>
- Cibrian Anaya, Z. R., Luque Vega, L. F., & López Neri, E. (2019). Transición de la Robótica Educativa a la Mecatrónica Educativa: Caso de estudio Ladrillo Inteligente EV3 y Controlador Lógico Programable. *Universo de la Tecnología*, 1(12), 19-22.
- Combaudon, S. (2018). *MySQL 5.7 Administración y Optimización*. Barcelona: Ediciones ENI.
- Editores SRL. (Junio de 2018). Historia de un sistema de automatización. *AADECA Revista*, 38-43.
- Fisic.* (s.f.). Recuperado el Enero de 2021, de Transferencia de calor: <https://www.fisic.ch/contenidos/termodin%C3%A1mica/trasferencia-del-calor/>

- Fonseca Jaramillo, J. F., & Llumiyinga Quiguango, E. G. (18 de Noviembre de 2018). Implementación de un módulo educacional utilizando un controlador lógico programable (PLC), para realizar un control de temperatura, un sistema de semaforización y arranque de un motor de inducción trifásico. Quito, Ecuador. Obtenido de Repositorio Digital - EPN: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19849>
- Garcés Mendoza, M., & Torres Romero, S. (5 de Enero de 1999). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/3019>
- Gonçalves, R. S., Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. (2020). Educational solar energy tool in Matlab environment. *Energy Reports*, 6(1), 490-495. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.013>
- Gutierrez, M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (Primera ed.). Santa Elena: UPSE.
- IDEAM. (2004). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Luzón Calderón, Y. G., & Quinchiguango De La Cruz, D. A. (8 de Mayo de 2018). Diseño e implementación de un módulo didáctico utilizando un controlador lógico programable (PLC) para la simulación de procesos industriales. Quito, Ecuador.
- Pasha, S. (2016). Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis. *International Journal of New Technology and Research*, 2(6), 19-23.
- Rautmare, S., & Bhalerao, D. M. (2016). MySQL and NoSQL database comparison for IoT application. *2016 IEEE International Conference on Advances in Computer Applications (ICACA)*, (págs. 235-238). Coimbatore. doi:[10.1109/ICACA.2016.7887957](https://doi.org/10.1109/ICACA.2016.7887957)
- Ruano Ruano, I., Gámez García, J., & Gómez Ortega, J. (Oct de 2016). Laboratorio Web de SCORM de Control PID con integración avanzada. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13(4), 472-483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.05.007>

-
- Young, H., & Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria* (Decimo segunda ed., Vol. I). Mexico: Pearson.
- Zayas-Gato, F., Quitian, H., Jove, E., Casteleiro-Roca, J.-L., & Calvo-Rolle, J. L. (2020). Diseño de Controladores PID. (U. d. Coruña, Ed.) Coruña, Coruña, España. doi:<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497855>
- Ziabari, M., & Sahand, S. (2019). A Modeling Environment for Dynamic and Adaptive Network Models Implemented in MATLAB. *Proceedings of the 4th International Congress on Information and Communication Technology (ICICT2019)*, (págs. 91-111). London. doi:[10.1007/978-981-15-0637-6_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0637-6_8)