CONTROL DE PROCESO AUTOMATIZADO OPERADO MEDIANTE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO T5553

LUIS FERNANDO BOTACHE
JAVIER DARÍO MESA

Director:
ING CESAR AUGUSTO HERNANDEZ

Codirector:
ING. ALFREDO CHACÓN

BOGOTÁ
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
2017

CONTROL DE PROCESO AUTOMATIZADO OPERADO MEDIANTE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO T5553

LUIS FERNANDO BOTACHE
JAVIER DARÍO MESA

Director:
ING CESAR AUGUSTO HERNANDEZ

Codirector:
ING. ALFREDO CHACÓN

BOGOTÁ
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
2017

CONTROL DE PROCESO AUTOMATIZADO OPERADO MEDIANTE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO T5553

LUIS FERNANDO BOTACHE
JAVIER DARÍO MESA

Proyecto de grado presentado al Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital "Francisco José De Caldas" Facultad Tecnológica, para obtener el título de Ingeniero Eléctrico

Director
ING. CESAR AUGUSTO HERNANDEZ

Codirector:
ING. ALFREDO CHACÓN

BOGOTÁ
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
2017

El consejo curricular de la Universidad Distrital

Francisco José De Caldas aprueba el trabajo de
Grado titulado:

"**Control de proceso automatizado operado mediante interfaz gráfica de usuario para el sistema de control de proceso T5553**"

En cumplimiento de los requisitos para obtener
El título de Ingeniero Eléctrico

_____

Ing. Cesar Augusto Hernández
DIRECTOR

_____

Ing. Alfredo Chacón
CODIRECTOR

Fecha de presentación: 24 de mayo de 2017

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecemos a dios por manifestar su aprecio hacia nosotros brindándonos salud y la oportunidad de culminar esta carrera, a nuestras familias porque no dan la fuerza e impulso para llegar a este punto, también al profesor Alfredo Chacón tutor de este proyecto de grado por apoyarnos y guiarnos y por último a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en especial al laboratorio de electrónica debido a que permitieron la realización de este proyecto.

Tabla de contenido

Introducción 12

Planteamiento del Problema 14

Objetivos 15

1 MARCO DE REFERENCIA Y MARCO TEÓRICO 16

1.1 ANTECEDENTES 16

1.2 MARCO TEÓRICO 17

1.2.1 BANCO DE TRABAJO 17

1.2.2 SENSORES 18

1.2.3 CONTROL ON OFF 20

1.2.4 SISTEMAS DE CONTROL 21

1.2.5 MODELADO DE SISTEMAS 22

1.2.6 DESCRIPCIÓN DEL PLC UTILIZADO Y EL CONTROLADOR 23

1.2.7 PID SIEMENS 24

1.2.8 DESCRIPCIÓN DEL PLC 25

1.2.9 DEFINICIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA 27

1.2.10 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA 27

1.2.11 CONTROLADORES 30

1.2.12 METODOLOGÍA 33

2 RUTINA DE OPERACIÓN 36

2.1 LINEALIZACIÓN DE LOS SENSORES 37

2.1.1 Ecuación característica de cada sensor 37

2.2 CONTROL AUTOMATICO DEL SISTEMA 40

2.2.1 Identificación del sistema 40

2.2.2 Sintonización del Controlador PID 44

2.2.3 Puesta en marcha del PID 44

3 INTERFAZ GRÁFICA 46

3.1 PARTES DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL PC 47

3.1.1 Pantalla Principal 47

3.1.2 Pantalla de instrumentos 49

3.1.3 Pantalla de visualización de las variables de proceso y válvula proporcional 50

3.1.4 Planta térmica y PI&D 51

4 GUÍAS DE LABORATORIO Y DE USUARIO 52
5 CONCLUSIONES 53
6 Bibliografía 54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de control de proceso Térmico [7] 17
Figura 2 Termistor [8] 18
Figura 3 RTD [9] 19
Figura 4 Termocupla [11] 20
Figura 5 Salida ON OFF 21
Figura 6 Salida PID. [15] 24
Figura 7 PID Siemens [16] 25
Figura 8 PLC. [16] 25
Figura 9 Interface Programación. [16] 26
Figura 10 Puerto Ethernet Cp343-1Lean. [16] 26
Figura 11 PID Ideal [18] 31
Figura 12 PID Paralelo [18] 31
Figura 13 Controlador universal tipo paralelo [18] 33
Figura 14 Controlador universal tipo serie [18] 33
Figura 15 Metodología para el desarrollo del proyecto (Fuente el autor) 34
Figura 16 Funcionamiento del Programa de rutina principal (Fuente el autor) 36
Figura 17 ejemplo de programación el LADDER (Fuente el autor) 37
Figura 18 Grafico resultante del termistor (Fuente autores) 38
Figura 19 Grafico resultante del termocupla (Fuente autores) 39
Figura 20 Grafico resultante de la RTD (Fuente autores) 40
Figura 21 Ecuación de la recta en LABVIEW (Fuente Autores) 40
Figura 22 Pasos para la identificación del sistema (Fuente el Autor) 41
Figura 23 Montaje Experimental (Fuente el Autor) 41
Figura 24 Respuesta Sensor RTD (Fuente el Autor) 42
Figura 25 Señal de Temperatura Filtrada (Fuente el Autor) 42
Figura 26 Señal identificada (Fuente el Autor) 43
Figura 27 Coeficientes del sistema en espacio de estados (Fuente el Autor) 43
Figura 28 Coeficientes del PID (Fuente el Autor) 44
Figura 29.Diagrama de bloques de las conexiones (Fuente el Autor) 45
Figura 30 Interfaz OPC Server (Fuente el Autor) 46
Figura 31. Interfaz OPC Quick Client (Fuente el Autor) 47
Figura 32. Pantalla Principal PC (Fuente el Autor) 48
Figura 33. Pantalla instrumentos (Fuente el Autor) 50
Figura 34 Variables de entrada y salida del proceso (Fuente el Autor) 51
Figura 35 PI&D (Fuente el Autor) 51
Figura 1.Planta de control de proceso T5553 58
Figura 2. Sensores y actuadores lazo 1 59
Figura 3. Sensores y actuadores lazo 2 59
Figura 4.P&ID planta control de proceso T5553 60

Figura 5.Paneles de la planta de control de proceso T5553.....60
Figura 6.Panel de actuadores de la planta de control de proceso T5553.....61
Figura 7. Panel de sensores de la planta de control de proceso T5553 62
Figura 8. Plataforma de aprendizaje PLC S7-300 63
Figura 9. Conexión de los sensores al PLC 64
Figura 10. Conexión de los actuadores al PLC.....65
Figura 11. Interfaz NI OPC SERVER 66
Figura 12, Ventana principal de SCADA 67
Figura 13. Lectura presente de los sensores 68
Figura 14. Curvas entradas y salida del sistema.....69
Figura 15. P&ID de la planta.....70
Figura 16. Incremento de la temperatura fluido del proceso.....72
Figura 17. Decremento de la temperatura fluido del proceso 73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Bloques Internos (Fuente el Autor) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 2 Rango de Trabajo de los sensores (Fuente autores) 37
Tabla 3 Datos transmisor IPAQ-LPlus (Fuente autores) 38
Tabla 4 Datos transmisor IPAQ-22L-ch1 (Fuente autores) 39
Tabla 5 Datos transmisor IPAQ-22L-ch2 (Fuente autores) 39
Tabla 6 Constantes utilizadas (Fuente el Autor) 44
Tabla 7 Resultados (Fuente el Autor) 45
Tabla 7 Partes de la Pantalla Principal (Fuente el Autor) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 8 Partes de la Pantalla Principal PC (Fuente el Autor) 49

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 Manual de Prácticas de Laboratorio

INTRODUCCIÓN

Mediante la presentación de este documento se muestra el desarrollo e implementación del proyecto; **"Control de proceso automatizado operado mediante interfaz gráfica de usuario para el sistema de control de proceso T5553",** dicho proyecto se incluye en la base de datos del laboratorio de electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas –Facultad Tecnológica- con la finalidad de crear una herramienta útil, como referente pedagógico y estudiantil, la cual, enseña la composición básica del sistema de control de proceso T5553 y la incorporación de controladores destinados al control de Temperatura.

Las prácticas de laboratorio planteadas se basan; en la realización de programas básicos para programar un PLC, linealización de sensores de temperatura de tipo industrial, manejo de bombas hidráulicas y por último, la elaboración de diagramas PI&D. Dichas prácticas, pasaran a hacer parte del contenido práctico de las asignaturas: Teoría del control, Control Discreto, Automatización e Instrumentación, correspondientes al plan de estudio de los proyectos curriculares Tecnología en Electricidad, Ingeniería eléctrica, además afín a otras profesiones (como Ingeniería en control, Electromecánica, Electrónica, entre otras).

El controlador para la T5553, fue diseñado con el fin de adaptar un PLC S7-300, el cual se programó usando el programa **STEP 7 PROFESIONAL** y la interfaz gráfica de usuario fue implementada y diseñada en el programa **LABVIEW**. Los programas mencionados anteriormente se encuentran licenciados para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con una licencia de tipo estudiantil. Como producto se entregaron guías de laboratorio, dichas guías muestran como desarrollar e implementar una interfaz gráfica, sincronizada con un PLC, además los circuitos eléctricos a implementar para garantizar una conexión entre los diferentes instrumentos de medición y actuadores, con un PLC forman un sistema integral automatizado junto con el sistema de control de proceso **"T5553"**.

En este documento se tuvo en cuenta el proyecto de grado titulado; "**Diseño e Implementación de Interfaz Gráfica de Usuario entre el Sistema de Control de Proceso T5554 y un PLC Siemens S7-300**" **[1]**, debido a que incorpora esquema de control para el sistema de control de proceso T5554, basado en un PLC siemens S7-300, realizó un control ON-OFF para controlar el pH de un tanque de proceso y su representación gráfica en un computador utilizando la interfaz gráfica del TIA portal, con la cual realizaba acciones de control sobre el tanque.

Para el diseño de las guías de laboratorio se tomó el proyecto de grado, "**Automatización del Sistema de Control de Proceso T5553 con un PLC Allen Bradley"** [2], esta tesis hace entrega de manuales prácticos de usuario para el sistema de control de proceso T5553, basando su funcionamiento en la programación de un PLC Allen Bradley y enseñando como realizar programas básicos, los cuales realizan un acercamiento entre los usuarios y el sistema de control de proceso de manera gradual.

Planteamiento del Problema

Debido a la constante evolución y automatización de los procesos en la industria, se convierte en una necesidad la implementación de un sistema de supervisión en diversas aplicaciones. Analizando el entorno de la universidad se puede observar que en la actualidad se cuenta con una herramienta para la realización de práctica en medición y control industrial, esta práctica no es lo suficientemente beneficiosas para la comunidad universitaria ya que no cuenta con un sistema completo de supervisión, con etapas que permitan aplicar practicas más diversas con enfoques industriales, acciones de control de forma remota, además de capturar la información para conservar un registro del estado de las variables para un posterior análisis.

En el laboratorio de electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se encuentran diferentes elementos para el aprendizaje en campos aplicados a la industria, que son usados por diferentes estudiantes. Dentro de esos se encuentra un sistema para el control de temperatura el cual es de uso pedagógico y se usa para la realización de prácticas en las asignaturas de instrumentación, control y automatización, pero esta planta no cuenta con un sistema de supervisión, control y adquisición de datos, lo que ocasiona que el aprendizaje en los estudiantes no sea completo y pueda generar problemas en su desempeño profesional.

Al carecer de un sistema eficiente para la enseñanza de las aplicaciones prácticas de la teoría orientada al control, la planta se convierte en un objeto el cual no será utilizado al 100% por los estudiantes, lo que se pretende con el proyecto es lograr algo funcional que sirva como herramienta para los estudiantes de ingeniería en control y tecnología en electrónica.

Este proyecto va dirigido a ambientes académicos que involucran directamente necesidades de aprendizaje teórico-práctico, y la Universidad Distrital sede tecnológica al no contar con las herramientas que brinden esa confrontación de lo visto en la teoría, en un espacio que permita el análisis práctico de las respuestas de los circuitos de control electrónico industrial, se implementará un sistema de control que otorga soluciones reales a la institución, y que permita desarrollar esta parte incluida en los programas académicos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo mediante una interfaz gráfica para el sistema de control de procesos térmicos T5553 del laboratorio de electrónica.

Objetivos Específicos

- Obtener e identificar el modelo del sistema de control de proceso térmico T5553 mediante un método experimental.
- Desarrollar e implementar un sistema de control y monitoreo mediante una interfaz gráfica para la variable temperatura del sistema de control de proceso térmico T5553.
- Evaluar y documentar mediante pruebas el desempeño del sistema de control y monitoreo implementado en el T5553.
- Realizar un manual con tres prácticas de operación del sistema de control integrado.

1 MARCO DE REFERENCIA Y MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

Fueron investigadas diferentes bases de datos tanto de los proyectos realizados anteriormente con las plantas junto con las disponibles en el acceso biblioteca digital de la Universidad Distrital

Para la realización de este proyecto de grado, se hizo una búsqueda dentro de las bases de datos de la universidad y algunos externos. En de los resultados se encontraron los siguientes trabajos relacionados con este proyecto:

En la búsqueda a nivel internacional se encontraron varios proyectos los cuales enlazaban la instrumentación virtual de Labview con diferentes PLC, uno en particular se titula **"Aplicación de control con Labview para el Siemens S7-1200 en red local e Internet"** [3]**,** el cual realiza una integración de un PLC siemens con el software LABVIEW para la monitorización de un proceso industrial, el cual de manera experimental muestra, cómo se puede implementar tecnologías de automatización en la investigación mediante el control de variables experimentales y personalizadas.

El segundo trabajo a nivel internacional se titula; **"CONNECTION OF SIEMENS PLC TO LABYIEW USING OPC."***,* en el cual se describe el proceso de sincronización usando comunicación OPC entre el Labview y un PLC S7-300, además de la integración con equipos de otros fabricantes buscando eficacia y eficiencia.

A nivel Nacional, se han encontrado varios proyectos como referencia, pero se han elegido tres debido a que sirvieron como guías para el desarrollo del presente proyecto ya que en ellos también se controla diferentes procesos de las plantas AMATROL. [5]

A continuación, se encuentra el proyecto de grado titulado; "**DISEÑO DE UN SISTEMA SCADA PARA LA PLANTA DE PROCESOS AMATROL T5552, DE LA FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**" **[5]**, incorpora un kit de aprendizaje 990-PS712 Portable PLC Learning System que se conforma de un PLC S7-1200, un panel de entradas y salidas, una HMI para el SCADA.

El proyecto de maestría, titulado **"PLATAFORMA DE APRENDIZAJE PARA CONTROL BATCH."** [6]**,** en él se obtiene la dinámica de cada planta por medio de un proceso de identificación, después de ello se procede a generar una red con el fin de controlar los diferentes lazos desde una interfaz realizada en Labview, monitorizando los sensores y accionando los diferentes actuadores de las plantas

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 BANCO DE TRABAJO

La planta térmica T5553, véase la figura 1, está dividida en módulos de trabajo con el fin que el usuario aplique los conceptos que se estudian en asignaturas tales como sistemas dinámicos, teoría de control entre otras, la planta se compone de dos tanques los cuales hacen parte de un proceso cíclico de flujo de agua, cada tanque pertenece a un circuito diferente que se interrelacionan por medio de un intercambiador de calor, los procesos en la misma son transparentes permitiendo a usuario conocer el estado del proceso por medio de los paneles montados en ella.



Figura 1 Sistema de control de proceso Térmico [7]

En la industria se pueden encontrar un sin fin de aplicaciones para sistemas de control del procesos, ya sea en la elaboración de bebidas alcohólicas, inyectoras de plástico, CNCs, fabricación de productos alimenticios entre otros, cada uno de los mencionados anteriormente poseen diferentes lazos de control para manipular variables tales como posición, ph, nivel, presión, temperatura entre otras. La planta de procesos térmicos T5553 permite emular un proceso común como el control de temperatura de un fluido usando intercambiadores de calor por si se desea que aumente o se reduzca, ya que didáctica permite a los estudiantes adquirir destrezas básicas como la calibración de sensores, transmisores en voltaje y en corriente, sintonización con diferentes metodologías de control para sus análisis entre otras [7].

El laboratorio adquirió varias plantas de control AMATROL con el fin de poder unificar sus funciones en cascada y simular un proceso real en el cual se manipulan variables como nivel, Ph, temperatura

y presión, con el fin de entender el comportamiento de un proceso con diferentes lazos y su control y gestión usando diferentes protocolos de comunicación ya sea profibus, Modbus, etc

1.2.2 SENSORES

El sistema de control térmico posee sensores de temperatura comúnmente usados los cuales se describirán a continuación.

1.2.2.1 TERMISTOR

El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor [8], son resistores no lineales cuya resistencia varia con la temperatura, véase figura 2, existen dos tipos de termistor

- PTC (Positive Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura positivo, la resistencia es directamente proporcional a la temperatura

- NTC (Negative Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura negativo, la resistencia es inversamente proporcional a la temperatura



Figura 2 Termistor [8]

Los termistores suelen fabricarse a partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel, o el óxido de cobalto. [8]

Sin embargo, a diferencia de los sensores RTD, la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal. Para un termistor NTC, la característica es hiperbólica. Para pequeños incrementos de temperatura, se darán grandes incrementos de resistencia. [8]

1.2.2.2 RTD

Es un detector de temperatura resistivo (Ver figura 3), es decir, un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura en el que se indica una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo. [9]



Figura 3 RTD [9]

Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia. [9]

Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino. [9]

1.2.2.3 TERMOCUPLA

Se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por metales diferentes cuyas uniones se mantiene a distinta temperatura [10], son usadas ampliamente por su versatilidad y bajo costo, véase figura 4,

.



Figura 4 Termocupla [11]

Normalmente las termocuplas industriales están compuestas por un tubo de acero inoxidable u otro material. En un extremo de esa vaina está la unión, y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

El éxito de las termocuplas en comparación con otros sensores de temperatura es que se encuentran en una gran variedad que permiten su uso en sistemas hostiles, para ello hay que tener en cuenta la aplicación y escoger la adecuada, por ejemplo, si se requiere para una medición que supere los 1200°C se puede elegir un tipo R o tipo S, cuyo rango se encuentra entre 0°C y 1600°C.

La salida de la termocupla suele conectarse a un transmisor, generalmente de 4-20mA o 0-10V el cual a la vez se conecta a un PLC para el procesamiento y análisis de la señal.

Los transmisores de temperatura se utilizan para evitar pérdidas de tensión o cuando un regulador o PLC no puede medir directamente la señal desde un sensor de resistencia. [11]

1.2.3 CONTROL ON OFF

El controlador tipo ON-OFF es de los más antiguos trabajados por el hombre, como su nombre lo indica solo posee dos valores: Activo o desactivo, debido a ello no es posible que un proceso suyo controlador sea de este tipo se estabilice en un solo valor, este según la necesidad va a estar oscilando alrededor del setpoint.

Debido a la fluctuación de la variable de proceso alrededor de la referencia se debe tener en cuenta parámetros tales como la frecuencia de oscilación, la dinámica del actuador y la histéresis del sistema, omitir lo anteriormente descrito implica un mayor desgaste del actuador junto con la obtención de resultados no esperados y/o inadecuados
Pegar imagen de histéresis

La histéresis se ve afectada por la amplitud de la oscilación, el setpoint, el tiempo de respuesta del sistema entre otros, véase figura 5.

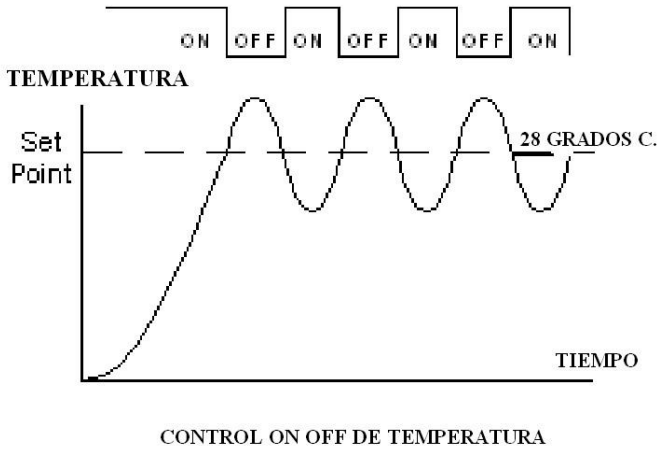


Figura 5 Salida ON OFF

TU = Tiempo muerto del sistema

w = Valor de referencia

T = Período de la oscilación

Xm = Ancho de sobre impulso de la oscilación

1.2.4 SISTEMAS DE CONTROL

El objetivo de un sistema es manipular los parámetros de un sistema base a fin de tener dominio sobre la salida del mismo según los requerimientos del proceso y el setpoint:

- Estar "protegido" ante perturbaciones que puedan generar comportamientos inadecuados del sistema
- Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido.
- Ser amigable a la hora de ser desarrollado con ayuda de un computador. [12]

Existen variadas tipologías de sistemas de control, sin embargo la más básica consta de sensor, controlador y actuador, a continuación se describen los elementos mencionados anteriormente

- Sensor: Es aquel que permite conocer el estado de la variable de proceso.
- Controlador: Es aquel al cual ingresa la señal de error (SP– VP) y se encarga de suministrar una señal al actuador con el fin de modificar o mantener el valor de la variable de proceso.

- Actuador: Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control. [12]

1.2.5 MODELADO DE SISTEMAS

Para la correcta sintonización de un controlador es necesario conocer la dinámica de la planta a fin de escoger los parámetros adecuados del mismo [13].

La identificación de sistemas refiere al reconocimiento y definición de problemas, su planteamiento o modelamiento mediante la aplicación de principios científicos y el desarrollo de procedimientos de solución con cuyos resultados se adquiera una total comprensión de la situación. [14]

Para obtener la dinámica del sistema es necesario modelar el mismo, dependiendo del tipo de sistema y los medios que se poseen es posible hallar la misma por diferentes métodos

- Modelos no paramétricos. Muchos sistemas quedan perfectamente caracterizados mediante un gráfico o tabla que describa sus propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros. Por ejemplo, un sistema lineal queda definido mediante su respuesta al impulso o al escalón, o bien mediante su respuesta en frecuencia. [14]

- Modelos paramétricos o matemáticos. Para aplicaciones más avanzadas, puede ser necesario utilizar modelos que describan las relaciones entre las variables del sistema mediante expresiones matemáticas como pueden ser ecuaciones diferenciales (para sistemas continuos) o en diferencias (para sistemas discretos). En función del tipo de sistema y de la representación matemática utilizada, los sistemas pueden clasificarse en:

- Determinísticos o estocásticos. Se dice que un modelo es determinístico cuando expresa la relación entre entradas y salidas mediante una ecuación exacta. Por contra, un modelo es estocástico si posee un cierto grado de incertidumbre. Estos últimos se definen mediante conceptos probabilísticos o estadísticos. [14]

- Dinámicos o estáticos. Un sistema es estático cuando la salida depende únicamente de la entrada en ese mismo instante (un resistor, por ejemplo, es un sistema estático). En estos sistemas existe una relación directa entre entrada y salida, independiente del tiempo. Un sistema dinámico es aquél en el que las salidas evolucionan con el tiempo tras la aplicación de una determinada entrada (por ejemplo, una red RC). En estos últimos, para conocer el valor actual de la salida es necesario conocer el tiempo transcurrido desde la aplicación de la entrada. [14]

- Continuos o discretos. Los sistemas continuos trabajan con señales continuas, y se caracterizan mediante ecuaciones diferenciales. Los sistemas discretos trabajan con señales muestreadas, y quedan descritos mediante ecuaciones en diferencias. [14]

1.2.6 DESCRIPCIÓN DEL PLC UTILIZADO Y EL CONTROLADOR

1.2.6.1 CONTROLADOR PID

Como su nombre lo define, PID es la sigla de (Proportional, Integrative, Derivative), es un tipo de controlador que usa la retroalimentación para generar una señal con el cual se manipule la variable de proceso, este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado. [15], debido a que es sencillo, económico y robusto es usado en gran variedad de procesos que van desde sencillos controles de temperatura hasta posición y pH.

Los tres componentes ya antes mencionados tienen una función particular, el proporcional depende del error actual puede llevar a la variable de proceso cerca al punto de consigna, sin embargo el error de estado estacionario no es cero, la parte integral depende de los errores pasados y se encarga de eliminar el error de estado estacionario, sin embargo genera sobreimpulso y oscilación alrededor del setpoint aumentado el tiempo de asentamiento, por último se encuentra el componente derivativo el cual es predictivo y reduce el tiempo de asentamiento pero el sistema es más vulnerable a perturbaciones externas, la suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de las ganancias de cada uno, con ello es posible controlar variables tan dispares como la velocidad de un motor, el nivel de un tanque o la temperatura algún sistema. [15]

En múltiples ocasiones es imposible acceder a la matriz del proceso lo cual implica el parcial desconocimiento del mismo, cuando ello sucede el controlador PID es una alternativa válida para controlar el sistema, no obstante, los actuales controladores digitales poseen autotunning lo cual implica el ajuste automático de las ganancias por medio de métodos computacionales.
El desempeño del controlador puede analizarse estudiando diferentes señales en distintos puntos del proceso tales como la señal error, la señal de control, la variable de proceso, así mismo es importante tener en cuenta parámetros como el sobreimpulso, la oscilación del sistema o la ventana de funcionamiento, cabe resaltar que la implementación de un controlador PID no siempre garantiza la estabilidad del sistema, (ver figura 6).

Dependiendo de la dinámica de la planta a controlar es posible que se pueda omitir el componente integral o el componente derivativo, son bastantes comunes los controladores PI ya que poseen mayor

inmunidad a las perturbaciones que los controladores PD y no es posible que el error de estado estacionario sea cero [15].

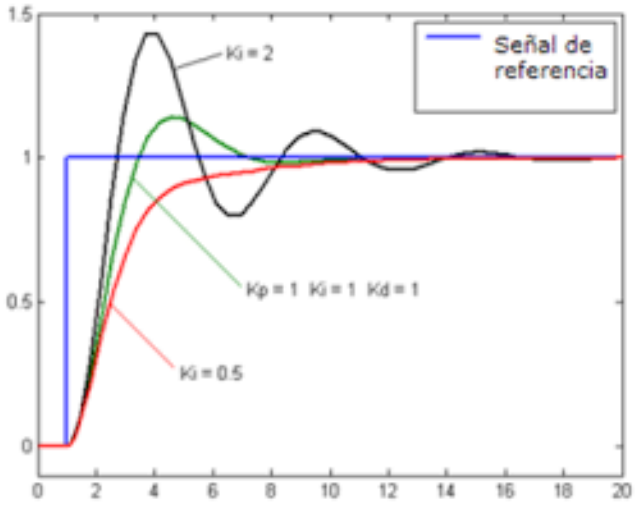


Figura 6 Salida PID. [15]

1.2.7 PID SIEMENS

Los PLCs ofrecen diferentes métodos para la implementación de controladores PID, se pueden usar ecuaciones en diferencias o bloques intrínsecos dentro del entorno de programación, este último es más adecuado ya que permite una fácil configuración a diferencia de ingresar la ecuación del PID
El bloque de función (ver figura 7) posee diferentes modos de uso los cuales son configurables dependiendo las necesidades del proceso y el comportamiento del mismo (Cascada, relación) [16]
Debido a que este bloque de función se basa en un algoritmo matemático PID, tendrá que ejecutarse cíclicamente, y los resultados matemáticos de dicho algoritmo y todos los valores de los parámetros que se explican a continuación se guardan en un DB. Por lo tanto, por cada FB41 se necesita un DB de instancia. [16]

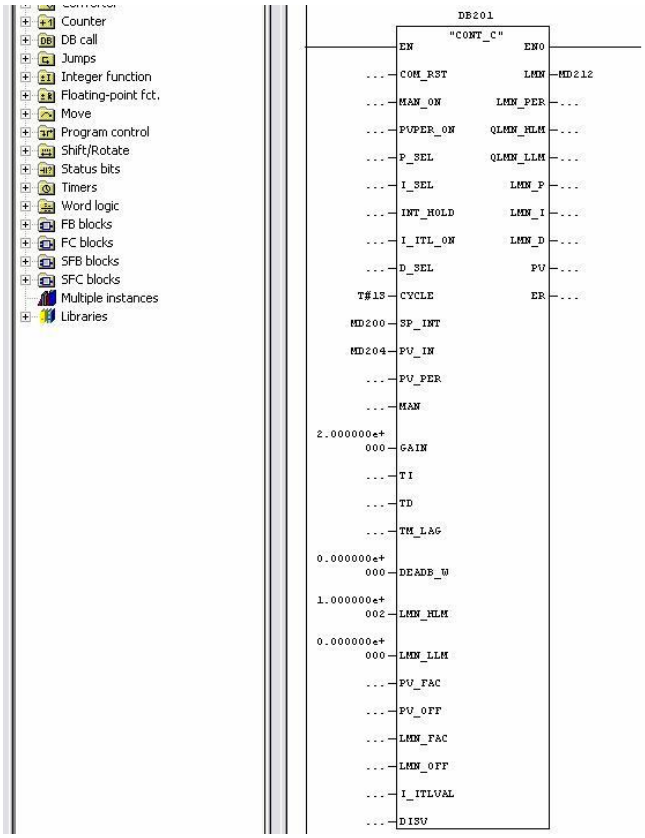


Figura 7 PID Siemens [16]

1.2.8 DESCRIPCIÓN DEL PLC

Para la implementación del sistema de control fue usado un PLC siemens S7-300 (Ver Figura 8), CPU 6ES7 313-5BG04-0AB0.



Figura 8 PLC. [16]

Este PLC posee 3 puestos de entradas digitales, 2 puestos de salidas digitales, adicionalmente tiene 4 entradas análogas y 2 salidas análogas configurables en tensión o corriente. Para la programación es usado una comunicación MPI con un adaptador USB (Ver Figura 9).



Figura 9 Interface Programación. [16]

Sin embargo, el PLC del laboratorio de control posee un puerto Ethernet Cp343-1Lean (ver Figura 10) el cual permite comunicar al PLC con la interface a través del protocolo de comunicación PROFINET. [16]



Figura 10 Puerto Ethernet Cp343-1Lean. [16]

1.2.9 DEFINICIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA

Es aquella plataforma la cual permite al usuario leer o configurar los procesos, cuando se usa en una pantalla adjunta a un sistema se le denomina HMI (Human Machine Interface). Estas por defecto deben ser directas, intuitivas y predictivas [17] con el fin de hacer más fácil la comprensión del proceso Se suele pensar que una interfaz de usuario debe tener una gran cantidad de paneles y menús, ello resta eficacia a la hora supervisar un proceso ya que pierde su carácter de simpleza.

Una interfaz básica de usuario debe poseer elementos como menús, ventanas, contenido gráfico, cursor, alarmas luminosas y sonoras, en general, todos aquellos canales por los cuales se permite la comunicación entre el ser humano y la computadora. [17]

1.2.10 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA

Preceptos básicos para el diseño de HMI [17]:

- Dar control al usuario.
- Reducir la carga de memoria del usuario.
- Consistencia.

Regla 1: Dar control al usuario.

El diseñador debe dar al usuario la posibilidad de hacer su trabajo, en lugar de suponer qué es lo que éste desea hacer. La interfaz debe ser suficientemente flexible para adaptarse a las exigencias de los distintos usuarios del programa. [17]
Principios:

- Usar adecuadamente los modos de trabajo.
- Permitir a los usuarios utilizar el teclado o el mouse.
- Permitir al usuario interrumpir su tarea y continuarla más tarde.
- Utilizar mensajes y textos descriptivos.
- Permitir deshacer las acciones, e informar de su resultado.
- Permitir una cómoda navegación dentro del producto y una fácil salida del mismo.
- Permitir distintos niveles de uso del producto para usuarios con distintos niveles de experiencia.

- Hacer transparente la interfaz al usuario, que debe tener la impresión de manipular directamente los objetos con los que está trabajando.
- Permitir al usuario personalizar la interfaz (presentación, comportamiento e interacción).
- Permitir al usuario manipular directamente los objetos de la interfaz. En suma, el usuario debe sentir que tiene el control del sistema.

Regla 2: Reducir la carga de memoria del usuario.
La interfaz debe evitar que el usuario tenga que almacenar y recordar información. [17]
Principios:

- Aliviar la carga de la memoria de corto alcance (permitir deshacer, copiar y pegar; mantener los últimos datos introducidos).
- Basarse en el reconocimiento antes que en el recuerdo.
- Proporcionar indicaciones visuales de dónde está el usuario, qué está haciendo y qué puede hacer a continuación.
- Proporcionar funciones deshacer, rehacer y acciones por defecto.
- Asociar acciones a los objetos (menú contextual).
- Presentar al usuario sólo la información que necesita (menús simples/avanzados, wizards, asistentes).
- Hacer clara la presentación visual (colocación/agrupación de objetos, evitar la presentación de excesiva información).

Regla 3: Consistencia. [17]

Permite al usuario utilizar conocimiento adquirido en otros programas. Ejemplo: mostrar siempre el mismo mensaje ante un mismo tipo de situación, aunque se produzca en distintos lugares.
Principios:

- Consistencia en la realización de las tareas: proporcionar al usuario indicaciones sobre el proceso que está siguiendo.
- Consistencia dentro del propio producto y de un producto a otro. La consistencia se aplica a la presentación (lo que es igual debe aparecer igual: color del texto estático), el comportamiento (un objeto se comporta igual en todas partes) y la interacción (los atajos y operaciones con el mouse se mantienen).

- Consistencia en los resultados de las interacciones: misma respuesta ante la misma acción. Los elementos estándar del interfaz deben comportarse siempre de la misma forma (las barras de menús despliegan menús al seleccionarse).

- Consistencia de la apariencia estética (iconos, fuentes, colores, distribución de pantallas).

- Fomentar la libre exploración de la interfaz, sin miedo a consecuencias negativas.

El HMI funcionará en pantallas de consola en computadoras. Se persigue como objetivo en esta guía proporcione las pautas del diseño de las pantallas para que las trampas visuales más comunes puedan evitarse y el cliente se muestre amigable y legible al usuario, además de adecuado a los objetivos del sistema. [17]

Algunas pautas para el diseño son:

- Cada elemento visual influye en el usuario no sólo por sí mismo, sino también por su combinación con el resto de elementos presentes en la pantalla.
- Demasiada simetría puede hacer las pantallas difíciles de leer.
- Si se ponen objetos sin alinear, hacerlo drásticamente.
- Elementos de tamaño y color similares se perciben como pertenecientes a un grupo.
- Asumir errores en la entrada del usuario.
- No se deben colocar demasiados objetos en la pantalla, y los que existen deben estar bien distribuidos.
- Cada elemento visual influye en el usuario no sólo por sí mismo, sino también por su combinación con el resto de elementos presentes en la pantalla. [17]

A continuación, se resumen las pautas para el diseño de una pantalla de HMI para el Sistema de gestión de alarmas:

- Fondos: usar los tonos apagados - gris claro es bueno.
- Sombra: es un método recomendado para fraccionamiento de una pantalla.

Los gráficos de fondo deben usar tonos suaves, deben ser evitados los colores de alarma. Utilizar el negro para resaltar objetos. [17]

- Texto: utilizar un tipo de letra estándar, que esté disponible en todos los PC.

El estado del sistema de alarma debe ser visible en todas las pantallas, se recomienda mostrarlo en la parte superior de la pantalla. [17]
Los colores de alarma seguirán la convención: rojo =alarma, amarillo = alerta, verde = estado OK, azul = acción obligatoria. [17]
Para alarmas: se recomienda el uso adicional de indicaciones que no dependan del color; por ejemplo, la posición, texto, señal sonora, etc. [17]
No se acepta el destello constante de las alarmas y debe ser evitada la conmutación automática de pantallas en caso de alarma. [17]

1.2.11 CONTROLADORES

Algunas de las funciones de transferencia de los PID's se pueden ver reflejadas a continuación en las ecuaciones (3, 4) [18]:

Controlador PID-Ideal:

$$u(s) = Kc\left[1 + \left(\frac{1}{Tis}\right) + \left(\frac{Tds}{\tau \int ds + 1}\right)\right]\big(r(s) - y(s)\big) \qquad (3)$$

Controlador PID-Serie

$$u(s) = Kc\left[1 + \left(\frac{1}{Tis}\right)\right]\left[1 + \left(\frac{Tds}{\tau \int ds} + 1\right)\right]\big(r(s) - y(s)\big) \qquad (4)$$

Las figuras 11 y 12 muestran los diferentes tipos de PID's uno de ellos es el ideal que tiene las acciones de control en paralelo y serie que sus acciones de control se ejecutan en cascada la diferencia.

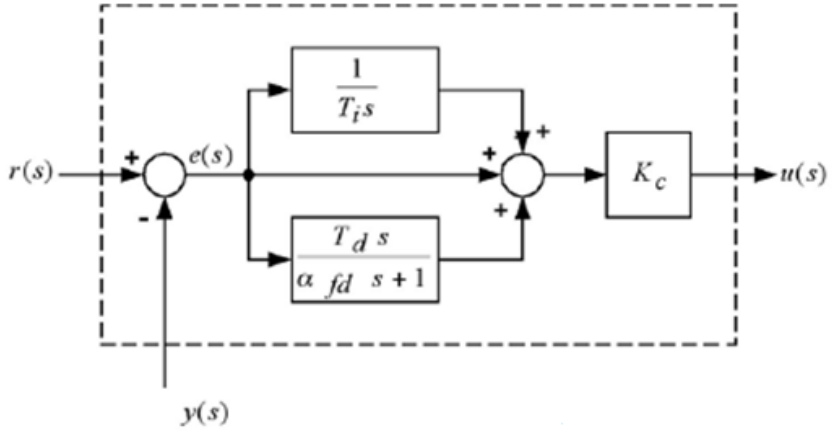


Figura 11 PID Ideal [18]

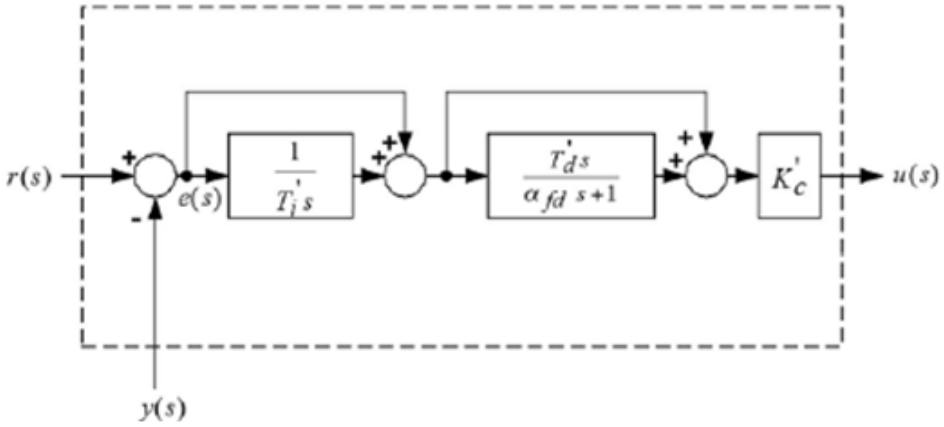


Figura 12 PID Paralelo [18]

1.2.11.1 ECUACIONES PARA CONTROLADORES PID UNIVERSALES

Los controladores PID universales tienen dos ecuaciones según su estructura como se indica a continuación [18];

Un controlador **PID Universal tipo Paralelo (PIDup)** será aquel en que las acciones de control integral y derivativo no interactúan una con la otra, como se muestra en la Figura 5, y estará representado por la ecuación (5).

Un controlador **PID Universal tipo Serie (PIDus)** será aquel que resulta de la colocación en serie de las acciones integral y derivativa, como se muestra en la Figura 6, y estará representado por la ecuación (6).

$$up(t) = Kcp\left[\left(\left(\frac{Kr}{\tau rP+1}\right)r(t) - y(t) + \left(\frac{1}{TisP}\right)\left(r(t) - y(t)\right)\right.\right.$$
$$+ \left(\frac{TdsP}{\alpha dTdsP+1}\right)(Kdr(t)$$
$$\left.\left. - (y(t))\right)\right]\left(\frac{1}{\tau \int p+1}\right) \quad (5)$$

$$up(t) = Kcp\left[\left(\left(\frac{Kr}{\tau rP+1}\right) + \left(\frac{1}{TisP}\right)\right)\left(1 + \left(\frac{KdTdsP}{\alpha dTdsP+1}\right)\right)r(t)\right.$$
$$\left. - \left(1 + \left(\frac{1}{TisP}\right)\right)\left(1 + \left(\frac{TdsP}{\alpha dTdsP+1}\right)\right)y(t)\right]\left(\frac{1}{\tau \int p+1}\right) \quad (6)$$

En las ecuaciones (5) y (6) las variables y parámetros son:

- *r(t)* valor deseado
- *up(t)* salida del controlador tipo paralelo
- *us(t)* salida del controlador tipo serie
- *y(t)* variable controlada
- *Kcp* ganancia, controlador paralelo
- *Tip* tiempo integral, controlador paralelo
- *Tdp* tiempo derivativo, controlador paralelo
- *Kcs* ajuste proporcional, controlador serie
- *Tis* ajuste integral, controlador serie
- *Tds* ajuste derivativo, controlador serie
- *Kd* selector, acción derivativa (Kd = 0 o 1)
- *Kr* factor de peso del valor deseado (0≤ *Kr*≤ 1)
- τ *d* constante del filtro derivativo.
- (0,05 ≤ *d* ≤ 0 ,20), normalmente,
- es fijado por el fabricante en 0.1
- τ f constante de tiempo, filtro *PID-IMC*
- τ *r* constante de tiempo, filtro del valor deseado
- *p* operador derivada *(d/dt)*

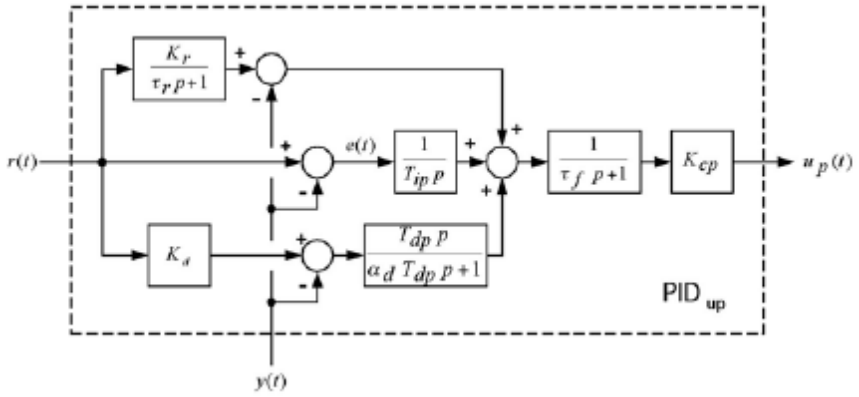


Figura 13 Controlador universal tipo paralelo [18]

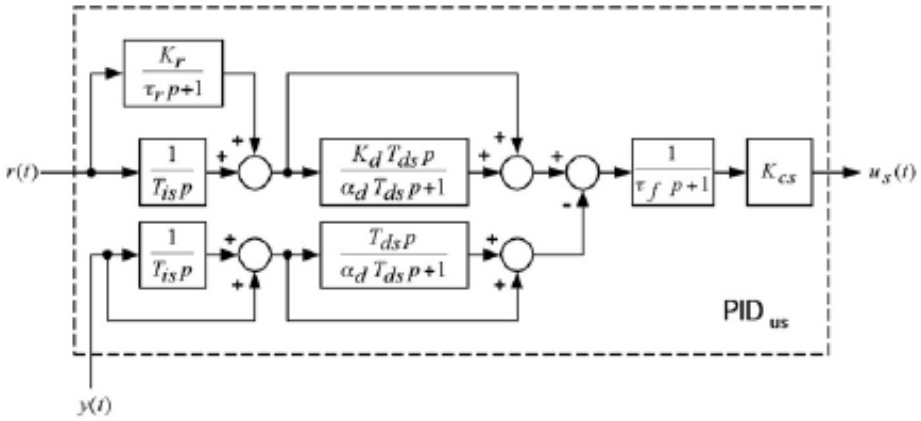


Figura 14 Controlador universal tipo serie [18]

1.2.12 METODOLOGÍA

El proyecto se realizó siguiendo los pasos mostrados en la figura 15, de manera secuencial desde la etapa de investigación y apropiación del conocimiento hasta la puesta en marcha del sistema de control de para la plana de proceso T5553.

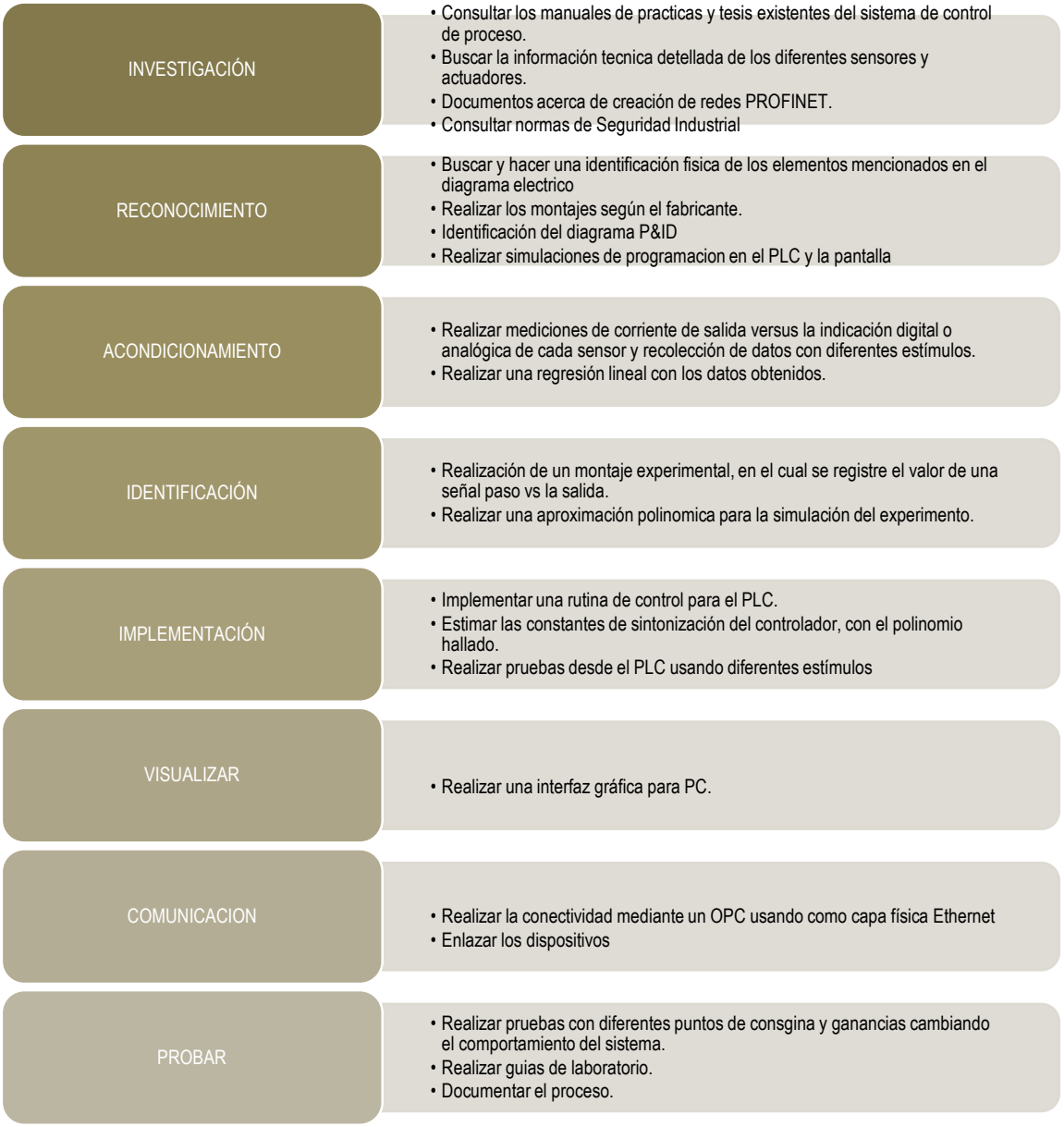


Figura 15 Metodología para el desarrollo del proyecto (Fuente el autor)

Investigación: En este bloque se genera una base de datos de documentos en los cuales se encuentre información relevante acerca de los elementos y prácticas existente para la manipulación de sistemas térmicos afines del a la planta de control de proceso T5553.

Reconocimiento: Con el fin apropiarse del conocimiento y entender el funcionamiento y características de la planta se realizan las practicas sugeridas por el fabricante y el manual otorgado por el laboratorio de electrónica.

Acondicionamiento: Después de ello se procede a verificar la correcta calibración de los sensores, en caso que no lo estén se toman puntos a diferentes temperaturas y con los datos recogidos se realiza una regresión lineal.

Identificación: Se realizó un montaje experimental, con el fin de hacer una recopilación de los datos de entrada de la planta (Estímulo) y el comportamiento de la misma ante varios de ellos, posteriormente esos datos son extraídos para obtener un modelo matemático de la dinámica de la planta

Implementación: Obtenido el modelo matemático de la planta se procede sintonizar el controlador con las ganancias halladas, se realizan ajustes múltiples a las ganancias con el fin de lograr el mejor desempeño posible del proceso.

Mostar: Para el diseño de la interfaz gráfica fueron seguidos los lineamientos explicados en anteriormente, esta fue modificada múltiples con el fin de hacerla más fácil de entender recopilando los datos de la planta en diferentes paneles.

Comunicación: Debido a que el control es realizado en el PLC y el SCADA en Labview fue implementada una comunicación OPC entre ambos con el fin de poder monitorear y controlar la planta desde la interfaz gráfica diseñada.

Probar: Se realizaron pruebas con el programa desarrollado variando el valor de consigna en diferentes instantes de tiempo con el fin de analizar el comportamiento del sistema, además de ir registrando y documentando sus resultados y a partir de estos resultados preliminares se escribieron las prácticas de laboratorio.

2 RUTINA DE OPERACIÓN

Para la realización de la rutina de operación del PLC, se realizó una linealización de los sensores de Temperatura, la linealización permite la operación de los controladores PID, que al igual que la operación manual funcionan de manera automática, con ayuda de una interrupción cíclica del PLC. Dicha rutina se encuentra representada en la figura 16. El programa fue realizado enteramente en LADDER (Ver figura 17) y la descripción de cada una de las funciones se encuentra en la tabla número 1.

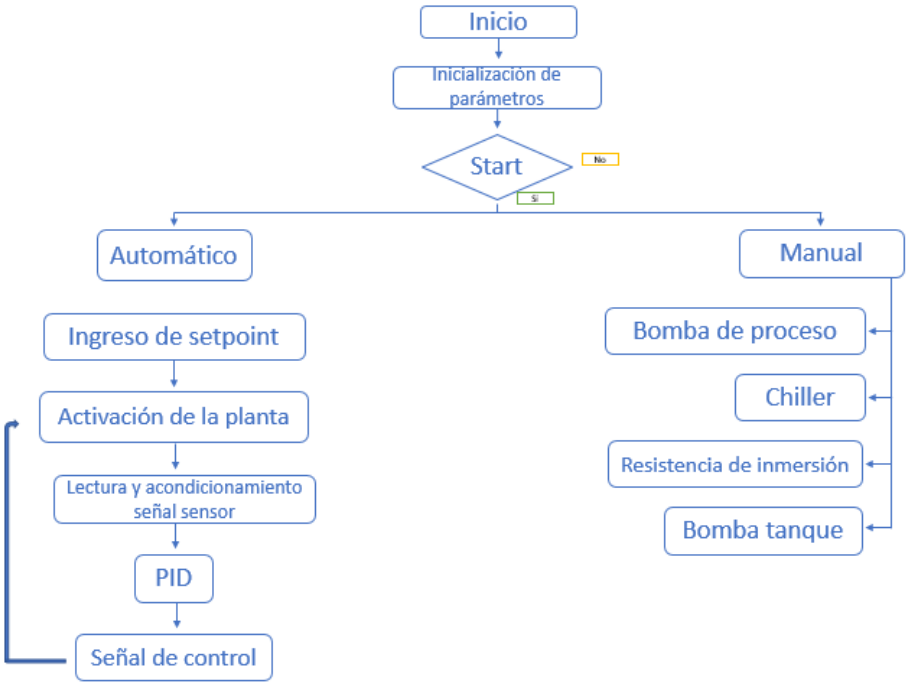


Figura 16 Funcionamiento del Programa de rutina principal (Fuente el autor)

La implementación del código particular se realizó enteramente en lenguaje LEADER utilizando lógica de contactos combinada con los bloques de funciones propios de STEP 7 como se muestra en la siguiente figura.

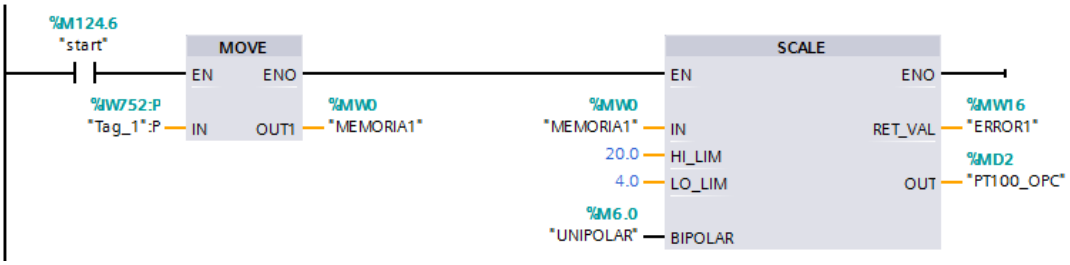


Figura 17 ejemplo de programación el LADDER (Fuente el autor)

2.1 LINEALIZACIÓN DE LOS SENSORES

El sistema de control de proceso T5553 se encuentra equipado con tres transmisores de temperatura que se encargan de convertir la señal de resistencia y/o tensión dependiendo del sensor para el cual se encuentra calibrado y ajustado por defecto, los sensores con que cuenta el sistema de control de proceso son;

- Termistor
- Termocupla
- RTD-PT100

Y cada uno de ellos se encuentra conectado con el transmisor relacionado en la siguiente tabla:

SENSOR	ENTRADA	RANGO	TRANSMISOR ASIGNADO	SALIDA	RANGO
Termistor	Resistencia	8.345-84 ohms	IPAQ-Lplus	Corriente	4-20mA
Termocupla tipo T	Tensión	2.036-20.810 mV	IPAQ-22L-ch1	Corriente	4-20mA
RTD-PT100	Resistencia	0-100 ohms	IPAQ-22L-ch2	Corriente	4-20mA
Nota: La salida de cada transmisor está configurado en el rango de -10°C a 100°C por defecto					

Tabla 1 Rango de Trabajo de los sensores (Fuente autores)

2.1.1 Ecuación característica de cada sensor

Para obtener la ecuación característica de cada sensor la cual va indicar dentro del PLC el valor actual de temperatura con respecto a la tensión de entrada en el conversor análogo digital, para realizarlo se conectó una resistencia a la salida de cada transmisor de 250 ohm cada una y se tabularon valores

en varios puntos trazando como resúltate una recta según los valores mostrados en las tablas 3, 4 y 5 y las figuras 13-15;

Temperatura actual [°C] Termistor	Corriente [mA]	Valor ADC
20	6,863	4948
23	7,51	6065
25	8,074	7040
30	9,337	9223
35	10,620	11440
40	11,806	13488
42	12,306	14353
45	13,048	15635
47	13,543	15635
50	14,285	17773
Ecuación Resultante (°C): 0,0023*VALOR_ADC + 8,6164		

Tabla 2 Datos transmisor IPAQ-LPlus (Fuente autores)

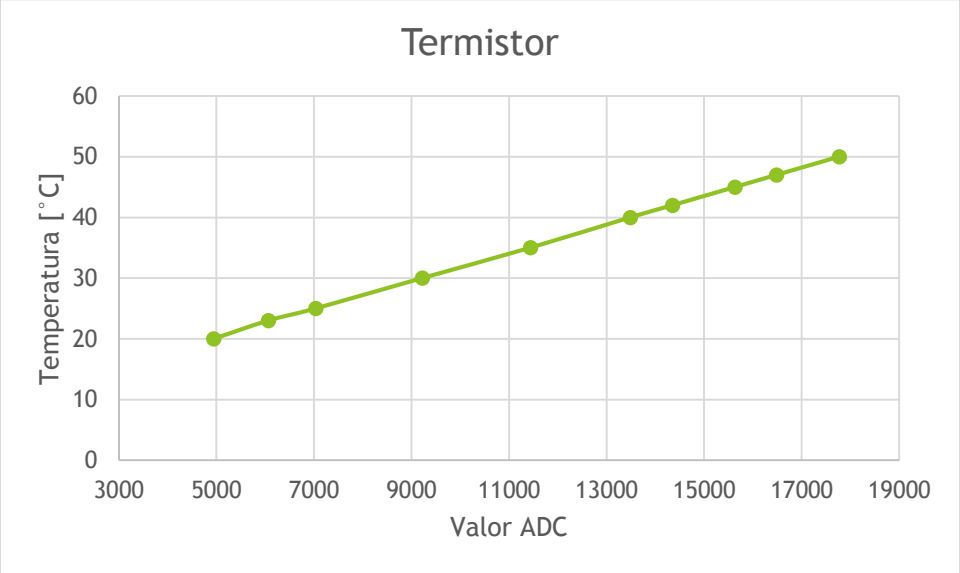


Figura 18 Grafico resultante del termistor (Fuente autores)

Temperatura actual Termocupla tipo T [°C]	Corriente [mA]	Valor ADC
20	9,368	9276
23	9,501	9506
25	9,590	9659
30	9,811	10042

35	10,033	10426
40	10,255	10809
42	10,344	10962
45	10,477	11192
47	10,566	11345
50	10,699	11575
Ecuación Resultante (°C): 0,013*VALOR_ADC-101		

Tabla 3 Datos transmisor IPAQ-22L-ch1 (Fuente autores)

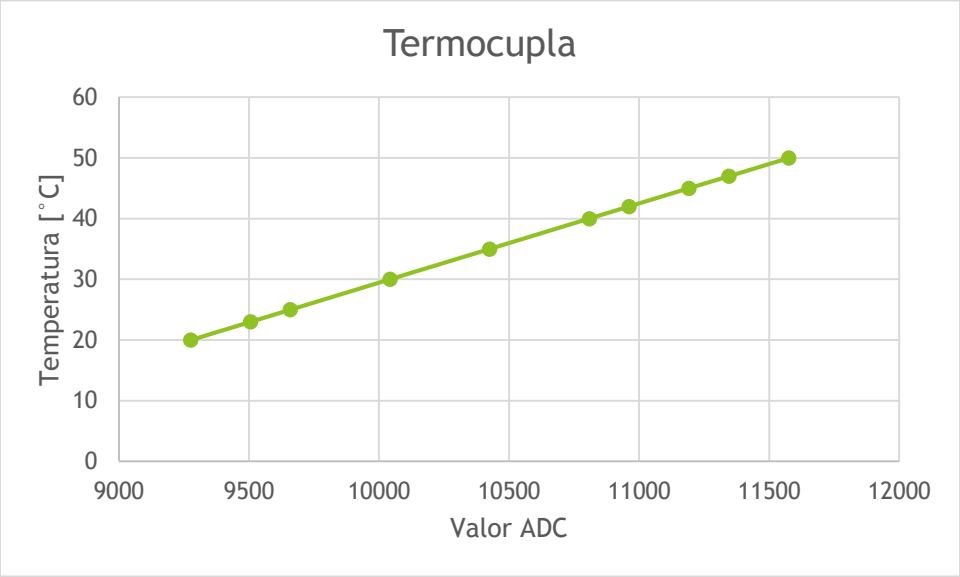


Figura 19 Grafico resultante de la termocupla (Fuente autores)

Temperatura actual RTD-PT100	Corriente [mA]	Valor ADC
20	8,598	7945
23	8,896	8461
25	9,095	8805
30	9,593	9664
35	10,090	10523
40	10,587	11383
42	10,786	11727
45	11,085	12242
47	11,283	12586
50	11,582	13102
Ecuación Resultante (°C): 0,0058*VALOR_ADC-26,228		

Tabla 4 Datos transmisor IPAQ-22L-ch2 (Fuente autores)

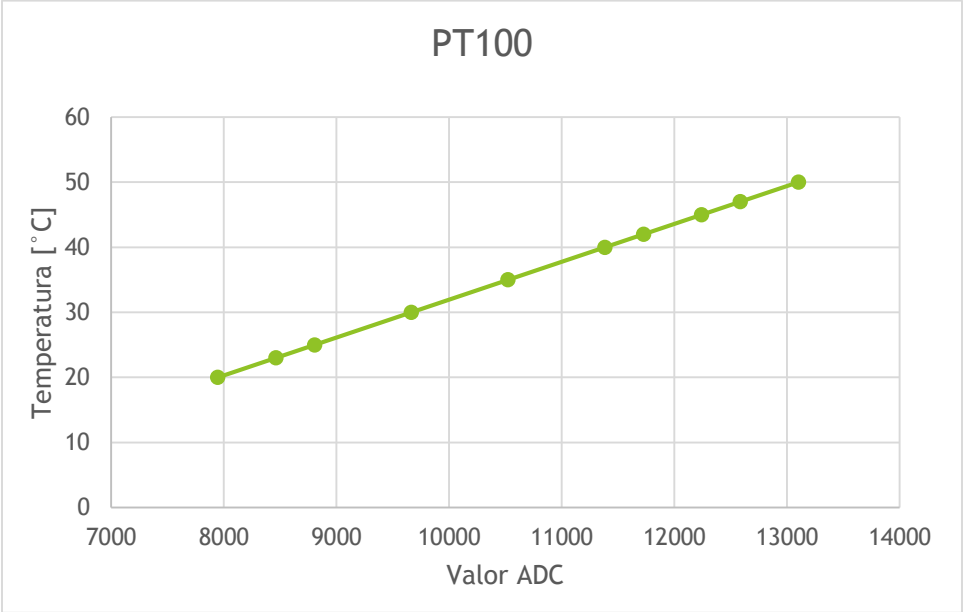


Figura 20 Grafico resultante de la RTD (Fuente autores)

Estas ecuaciones se ingresaron al código en lenguaje LADDER de la figura 16;

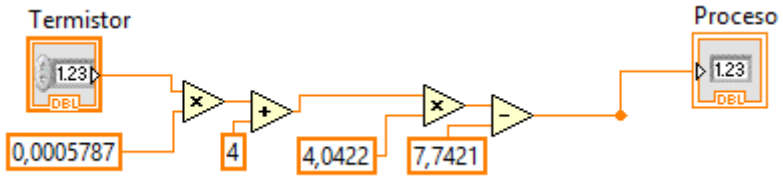


Figura 21 Ecuación de la recta en LABVIEW (Fuente Autores)

2.2 CONTROL AUTOMATICO DEL SISTEMA

Para la implementación de la rutina de control, se usó un bloque PID Siemens destinado a funcionar en los PLC S7-300, el tiempo de muestreo de dicho bloque es regulado con la interrupción la cual funciona con un tiempo de muestreo de 10kHz. Sin embargo, antes de realizar el control se realizó una parametrización del sistema a través de la identificación del mismo, usando un método experimental como se muestra en el numeral 3.2.1.

2.2.1 Identificación del sistema

Las observaciones hechas de un sistema, pueden ser representadas mediante una ecuación o expresión matemática. Para comprobar dicha expresión, esta debe ser estimulada con una variación y los datos de salida obtenidos, deben acercarse a los valores medidos (Considerando que un 70% es aceptable, basado en [19]).

Matlab cuenta con un TOOLBOX [20] de modelado de sistemas llamado IDENT, para realizar un modelo aproximado de medidas o grupos de datos almacenados en formato de archivo de texto. Para realizar un modelado se deben seguir los pasos mostrados en la figura 22.

Medición

- Medir el estimulo aplicado al actudor para que funcione.
- Medir los cambios en la variable de proceso.

Almacenaimiento

- Crear una base de datos con las medidas obtenidas, ordenadas en dos columnas (entrada, salida)

Importación datod

- Cargar el archivo en Matlab.

Modelar

- Abrir el Toolbox ident .
- Seleccionar la opcion dominio en el tiempo, y digite los nombres de las columnas importadas en entrada y salida junto con la frecuencia de muestreo.
- Seleccionar la estrategia de identificación
- Verificar el resultado.

Figura 22 Pasos para la identificación del sistema (Fuente el Autor)

El modelo realizado se basa en un método experimental (Figura 20), este comprende la adquisición de los datos a la salida de los sensores usando un osciloscopio, los sensores registran la respuesta a la señal paso generada desde el PLC, por ende, la respuesta de la variable de proceso es graficada en el osciloscopio (figuras 24 y 25). Por último, los datos se exportaron directamente desde el osciloscopio a un archivo de texto plano.



Figura 23 Montaje Experimental (Fuente el Autor)

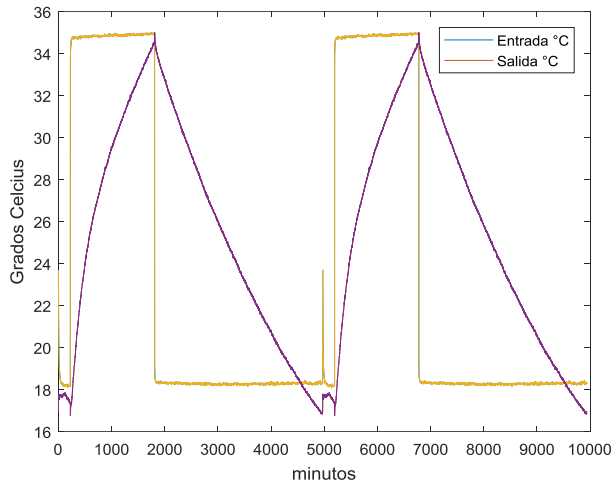


Figura 24 Respuesta Sensor PT100 (Fuente el Autor)

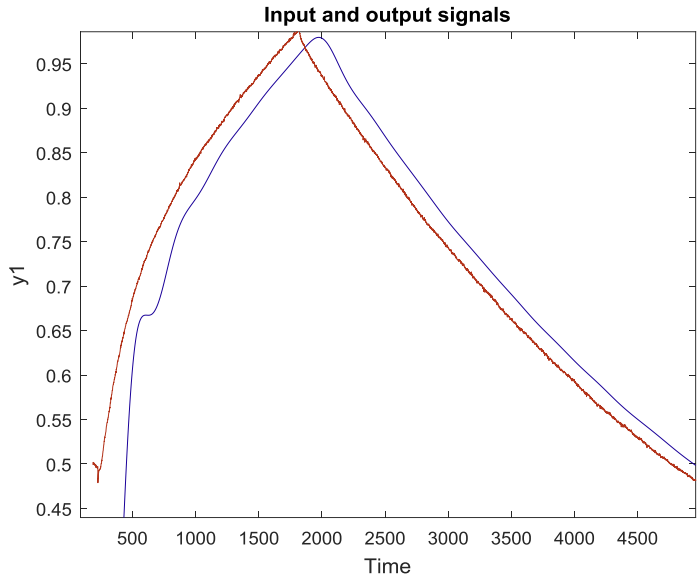


Figura 25 Señal de Temperatura Filtrada vs Señal identificada (Fuente el Autor)

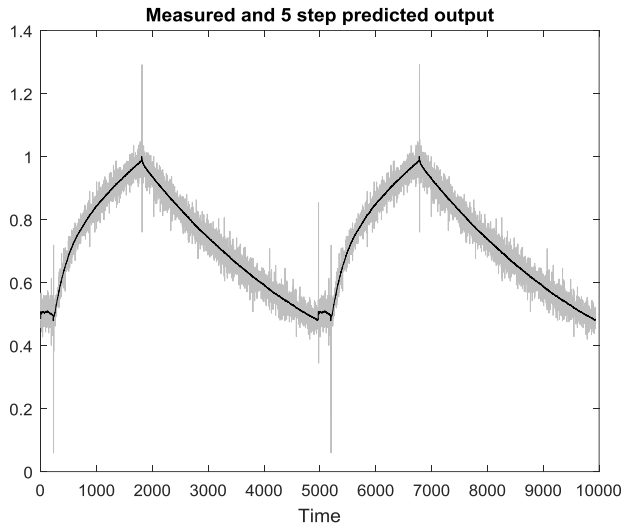


Figura 26 Señal identificada (Fuente el Autor)

Una vez obtenida la señal se procede a parametrizar el sistema, en este caso se realizó mediante espacio de estados (ecuación 7) debido a que la correlación obtenida, para ambas variables de proceso es mayor al 80%, por lo tanto, tiene un nivel de confianza alto, las ecuaciones resultantes representan a la señal filtrada (Figura 26).

$$x(t+Ts) = A\,x(t) + K\,e(t), \quad y(t) = C\,x(t) + e(t) \qquad (7)$$

```
A =
                        x1                      x2                      x3                      x4
 x1           1 +/- 2.358   -0.0009221 +/- 1.331  -0.0003383 +/- 0.8807   5.438e-05 +/- 0.2784
 x2    0.0002886 +/- 94.82       0.9999 +/- 21.99   -0.009961 +/-  15.67   -0.003363 +/-  12.39
 x3    0.0001721 +/- 28.86         0.01 +/- 32.09      0.9999 +/-  24.62     0.01226 +/-  19.46
 x4    -0.007329 +/- 117.7     0.003162 +/- 29.49    -0.01231 +/-   27.1      0.9994 +/-  24.15

C =
                   x1                 x2                  x3                  x4
 y1    44.65 +/- 527.7     0.0587 +/- 167  0.01174 +/- 112.5  -0.3832 +/- 8.428

K =
                        y1
 x1      439.5 +/- 6.661e+04
 x2       2240 +/- 1.373e+07
 x3       3465 +/- 3.485e+07
 x4  5.164e+04 +/- 7.977e+06
```

Figura 27 Coeficientes del sistema en espacio de estados (Fuente el Autor)

2.2.2 Sintonización del Controlador PID

Para estimar las constantes de sintonización del controlador PID, a partir del modelo matemático de la planta. Se importó el modelo encontrado a la herramienta PIDTuner de Matlab, en la cual se varían los polos y ceros de la ecuación hasta encontrar dichas constantes (en la figura 28 se muestran las constantes para el PID. Las constantes fueron programadas en la rutina de control principal para evaluar el comportamiento del PID con las constantes proporcionadas por el modelo simulado.

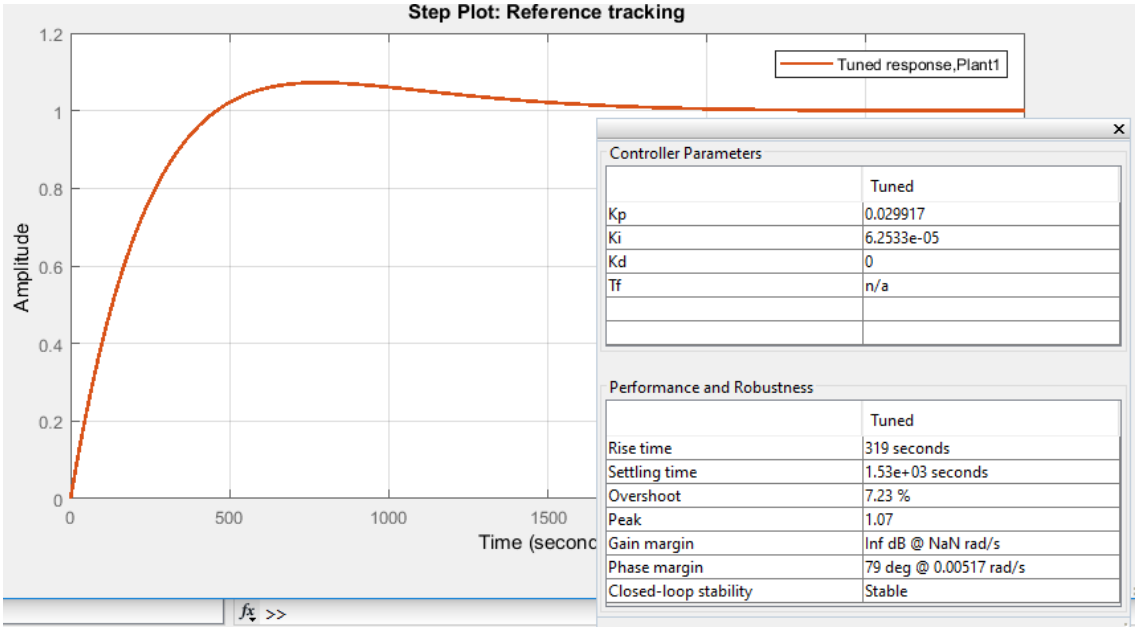


Figura 28 Coeficientes del PID (Fuente el Autor)

2.2.3 Puesta en marcha del PID

Las constantes del PID encontradas usando la simulación, fueron programadas en la rutina principal de operación y se puso a funcionar el controlador PID con el fin de controlar la variable de proceso, durante el funcionamiento se observó que las constantes halladas usando el simulador alcanzan un error de estado estacionario menor al 5% (lo cual está en un rango tolerable [21]). Sin embargo, se realizaron ajustes manuales para reducir el tiempo de estabilización ya que el proceso se tornó lento, dichos ajustes se muestran en la tabla 5 y los resultados obtenidos en la tabla 6.

	Simulado	Real
Kp	5.17	12.38
Ki	303	2.58
Kd	7.61	0.7

Tabla 5 Constantes utilizadas (Fuente el Autor)

Error de estado estacionario "Simulado"	Error de estado estacionario "Real"	Tiempo de Estabilización "Simulado"	Tiempo de Estabilización "Real"
3%	1,5%	30min	2min

Tabla 6 Resultados (Fuente el Autor)

.

Para realizar el control del sistema se realizó un acople del PLC con los dispositivos externos (Ver Figura 30), una vez conectados los dispositivos se procede a correr la rutina principal y probar el programa. Los dispositivos físicos se conectaron siguiendo el siguiente diagrama.



Figura 29.Diagrama de bloques de las conexiones (Fuente el Autor)

3 INTERFAZ GRÁFICA

Se siguieron los criterios mostrados en el numeral 1.2.7, esta interfaz se desarrolló usando el programa Labview® de National Instruments, El SCADA, cuenta con un total de cuatro pantallas en las cuales se realiza una representación y control de todas las variables de proceso, ello se logra por medio de comunicación OPC entre el PLC y Labview, la cual es implementada usando el servidor NI OPC SERVERS, se pueden observar las variables compartidas en el servidor, véase figura30

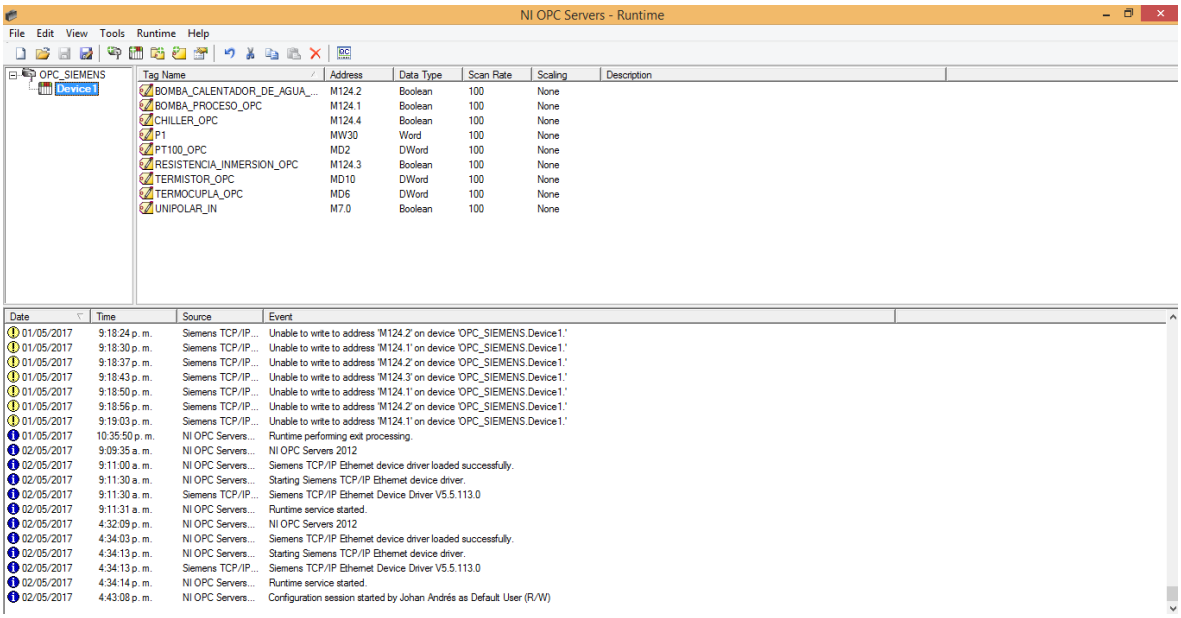


Figura 30 Interfaz OPC Server (Fuente el Autor)

La interfaz de NI OPC Server permite supervisar de manera manual el estado de las variables que inciden en el proceso sin importar su naturaleza numérica (Booleano, Entero, Flotante, Double), lo único es asegurarse de la correcta configuración de la comunicación y el adecuado direccionamiento de las variables (Véase figura 31).

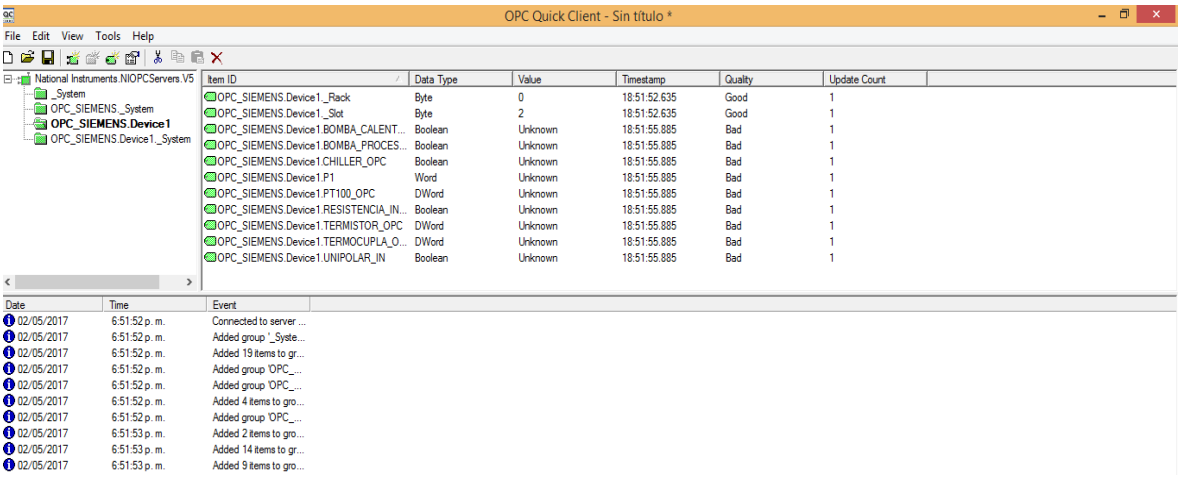


Figura 31. Interfaz OPC Quick Client (Fuente el Autor)

3.1 PARTES DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL PC

La interfaz gráfica destinada para el operador, se compone de cuatro pantallas diferentes las cuales son;

- Pantalla Principal
- Pantalla de sensores de temperatura
- Pantalla de Visualización de la temperatura en función del tiempo
- Pantalla de PI&D

3.1.1 Pantalla Principal

La pantalla principal (figura 32), se abre por defecto cuando se inicia el programa. Su función es dar la perspectiva a usuario respecto al funcionamiento de la planta, mostrar las variables principales del proceso, la activación de los diferentes elementos que hacen parte de la planta, el rol de cada uno de los elementos se muestra en la tabla 8.

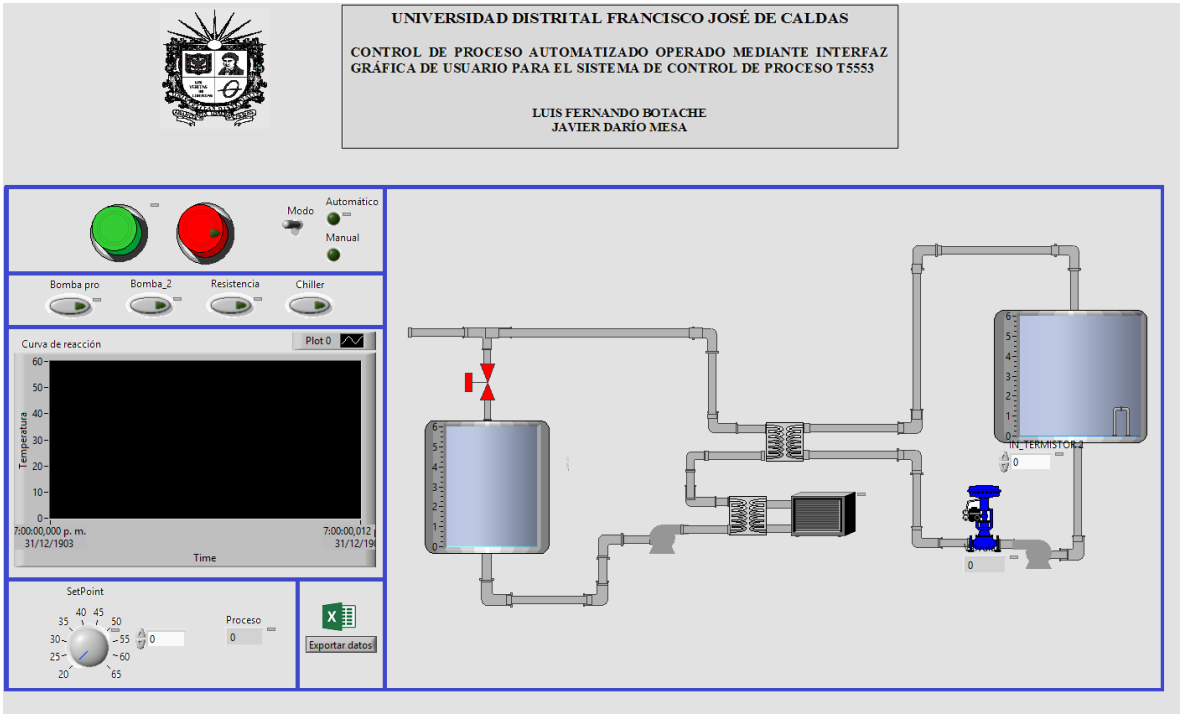
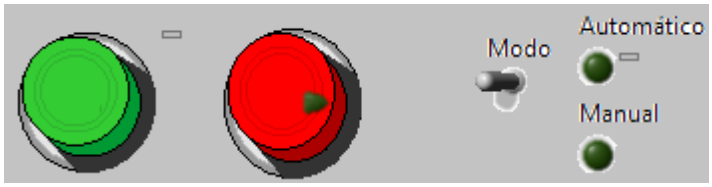
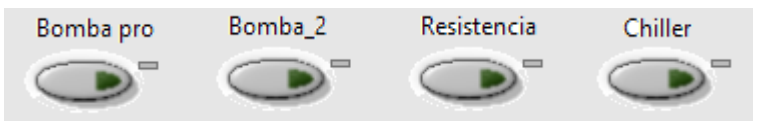


Figura 32. Pantalla Principal PC (Fuente el Autor)

PARTES DE LA VENTANA	
	La barra encabezado contiene el nombre del proyecto junto a los autores
	El panel de inicio parada, donde se encuentran presentes los pulsadores que dan inicio o paran el funcionamiento de la planta
	Los botones de acción que permiten encender o apagar los actuadores del sistema

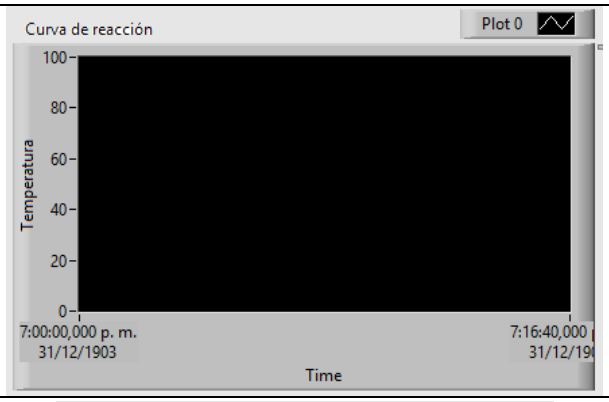
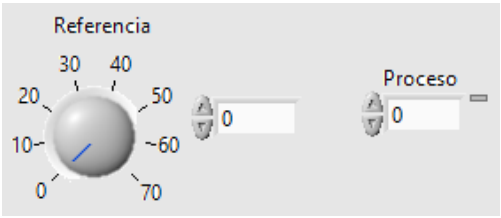
	El panel de visualización el cual permite observar el comportamiento de la variable de proceso en función del tiempo
	Este panel permite la selección del setpoint al cual se desea llevar el proceso, así como la temperatura actual del mismo
	Si se desea realizar algún análisis acerca del comportamiento de la planta de proceso este boton se encarga de generar una hoja de calculo donde se almcenan los datos.

Tabla 7 Partes de la Pantalla Principal PC (Fuente el Autor)

3.1.2 Pantalla de instrumentos

Esta pantalla (Ver figura 37) se encarga de mostrar el valor actual de los diferentes sensores de temperatura que posee la planta, está diseñada para facilitar la calibración de cada uno de ellos.

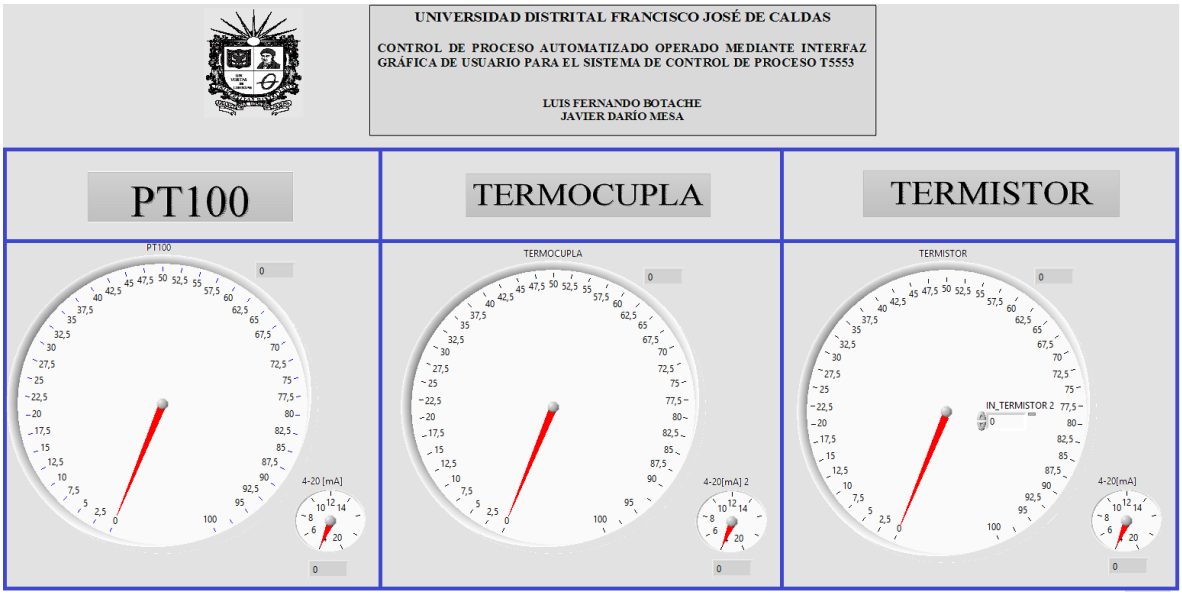


Figura 33. Pantalla instrumentos (Fuente el Autor)

3.1.3 Pantalla de visualización de las variables de proceso y válvula proporcional

Cuando se oprime la pestaña “Curvas instrumentos” esta despliega una pantalla la cual permite observar el comportamiento de la variable de proceso junto con las mediciones de temperatura de la termocupla y el termistor, adicionalmente muestra la variable de control en un rango de 4-20 mA, la cual incide sobre la válvula proporcional.



Figura 34 Variables de entrada y salida del proceso (Fuente el Autor)

3.1.4 Planta térmica y PI&D

Esta pantalla (Figura 35) muestra el diagrama de conexiones de tuberías y su relación con el esquema eléctrico entre sensores y actuadores. Además, posee un botón de volver a la pantalla principal.

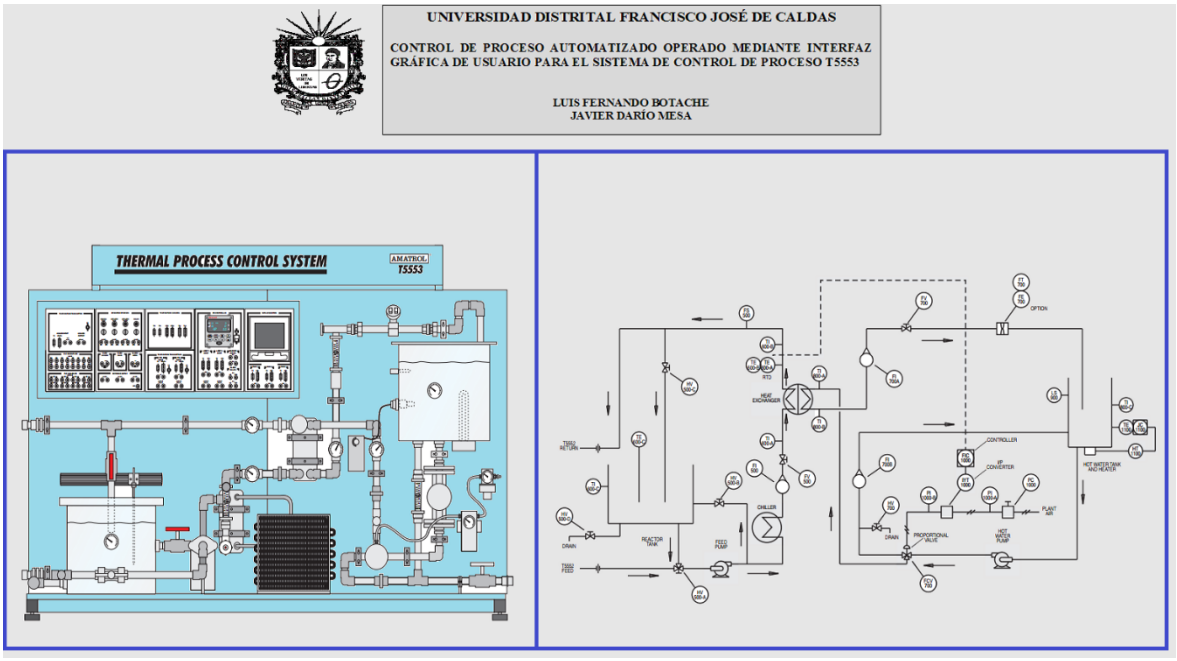


Figura 35 PI&D (Fuente el Autor)

4 GUÍAS DE LABORATORIO Y DE USUARIO

Se diseñaron tres guías de laboratorio que muestran cómo se puede manejar el PLC y SCADA, que muestran cómo se puede utilizar el sistema de control de proceso T5553, las guías de laboratorio se componen de las siguientes partes;

- Nombre
- Finalidad u objetivo de la practica
- Configuración inicial
- Problema
- Solución Propuesta al Problema.

La finalidad muestra el propósito de la práctica y la competencia que se pretende desarrollar.

Configuración inicial muestra los pasos para la puesta a punto del sistema o las verificaciones que haya que hacer del sistema antes de manipularlo.

Problema muestra el reto propuesto al estudiante.

Y por último se encuentra la solución propuesta al reto planteado con anterioridad.

Las prácticas propuestas son las siguientes:

- Reconocimiento de entradas y salidas; La finalidad de esta práctica es realizar un programa que permita conocer como es el direccionamiento de los puertos y el funcionamiento de los mismos.
- Reconocimiento de la interfaz gráfica; La finalidad de esta práctica es mostrar cómo se deben conectar el PLC y la SCADA para que funcionen en conjunto.
- Conectar el PLC con el sistema de control de proceso y la idea es interactuar aprendiendo el manejo de algunos de los actuadores.

5 CONCLUSIONES

- Las guías de laboratorio permitieron que los futuros usuarios del sistema de control de proceso T5553 tengan una base que les permitirá identificar los elementos de instrumentación y control de una manera más fácil sin necesidad de recurrir al manual o la hoja técnica acelerando el proceso de aprendizaje y apropiación del conocimiento.

- La interfaz gráfica permite desarrollar las prácticas de laboratorio de una manera más amigable, debido a que los mímicos permiten conocer el sistema de control de proceso T5553 de una manera didáctica y ubicarlos físicamente dentro de la distribución de los elementos de control.

- El PLC permitió aumentar la cantidad de prácticas que se pueden realizar en el sistema de control de proceso ya que las existentes en los manuales son muy básicas y se limitan solamente a encender los dispositivos y en algunos casos realizar medidas con un multímetro, con este proyecto se muestra una nueva forma de trabajar con los sistemas de control de proceso incorporando un dispositivo programable.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] H. A. S. Gil, Diseño e Implementación de Interfaz Gráfica de Usuario entre el Sistema de Control de Proceso T5554 y un PLC Siemens S7-300, Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2014.

[2] J. T. Zambrano, Automatizacion del sistema de Control de proceso T5553 con un PLC Allen Bradley, Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2015.

[3] J. C. MENDOZA., CONTROL Y MONITOREO SCADA DE UN POCESO EXPERIMENTAL USANDO EL SOFTWARE LABVIEW, Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2009.

[4] E. M. SILVESTRE, Control de Temperatura en instalaciones de distribucion de edificios inteligentes, Mexico: Universidad Autonoma de Mexico, 2014.

[5] H. C. Milena Mendez, Diseño de un sistema SCADA para la planta de procesos Amatrol t5552, de la Facultad de Medio Ambiente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá: Universidad Distirtal Francisco José de Caldas, 2015.

[6] E. Y. G. GONZALEZ, PLATAFORMA DE APRENDIZAJE PARA CONTROL BATCH, BOGOTÁ D. C.: Universidad Javeriana, 2014.

[7] AMATROL, Introduction to Proccess Control Termic Process Control, Bogota: AMATROL, 2010.

[8] A. P. Malvino, Principios de Electrónica, Mc Graw Hill. ISBN 84-481-2568-1, 2000.

[9] National Instruments, Elegir un sistema de medidas o transmisor, Disponible en: http://www.ni.com/white-paper/3643/es/, 2015.

[10] A. Creus, Instrumentación Industrial, Mexico DF: AlfaOmega, 1998.

[11] A. y. Lukian, Physics of thermoelectricity, Institute of Thermoelectricity, 1998.

[12] N.S. Nise., Sistemas de Control para Ingeniería., México: CECSA, 2002 .

[13] V. Alfaro, «IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS SOBREAMORTIGUADOS USANDO TÉCNICAS DE LAZO ABIERTO,» *Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica,* vol. 11, pp. 11-25, 2001.

[14] Warchol, E. J. et al., Alinement and modeling of hanford excitation control for system damping. In: Power apparatus and systems, IEEE Transactions on., IEEE, 1971.

[15] O. Katsuhiko, Ingeniería de control moderna.

[16] Manual del sistema de automatización Simatic S7 300.

[17] P.R.V, Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI), Argentina: Oveja Negra, 2004.

[18] Rivera, D.E., M. Morari y S. Skogestad, Internal model Control 4. PID ControllerDesign, USA: Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.(EUA), 1986.

[19] M. M. Miguélez , Validez y confiabilidad en la metodología cualitativa, Maracay: Scielo, 2006.

[20] H. Gomez, Introduccion a los sistemas de Control, Brasil: Practice Hall, 2010.

[21] S. Road, Torno-Manual del Operador, Oxnard: Haas Automation, 2012.

[22] AMATROL, Introduction to Proccess Control Pressure Control, Bogota: AMATROL, 2010.

[23] AMATROL, Introduction to Proccess Control Pressure, Bogota: AMATROL, 2010.

[24] «Direct Industry,» 3 8 2016. [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/fiama/product-15050-465421.html.

[25] A. P. García., CURSO DE INSTRUMENTACION, Brasil: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN LUIS POTOSI , 2010.

[26] J. C. Villajulca, «Instrumentación y Control,» 3 8 2016. [En línea]. Available: http://www.instrumentacionycontrol.net/.

[27] Sensing, «Transductores de Presion Industriales,» 3 8 2016. [En línea]. Available: http://www.sensing.es/Transductores_de_presion_Cm.htm.

[28] Siemens, Manual del Sistema Siemens, USA: Siemens, 2016.

ANEXO 1

MANUAL DE PRÁCTICAS

“CONTROL DE PROCESO AUTOMATIZADO OPERADO MEDIANTE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO T5553”

INTRODUCCIÓN

Este manual comprende tres prácticas planteadas en el marco del proyecto de grado **"CONTROL DE PROCESO AUTOMATIZADO OPERADO MEDIANTE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO T5553"**, en cada de ellas se describen los pasos seguir con sus correspondientes diagramas.

Prerrequisitos

- Lectura de planos P&ID.
- Manejo básico de Labview.
- Manejo básico de TIA Portal

Precauciones

Antes de empezar con las prácticas asegúrese de:

- Leer el manual de prácticas el cual se encuentra en el sitio web del laboratorio de electrónica
- La adecuada conexión de la planta a la toma eléctrica.
- El nivel de los tanques sea el adecuado para su correcto funcionamiento.
- El voltaje de la fuente embebida de la planta.
- La posición de las válvulas manuales.

Elementos a usar

- Planta térmica T5553 AMATROL.
- Equipo de cómputo con puerto Ethernet, Labview 2012 y TIA 2012 instalados, adicionalmente es requerido NI OPC Server para la comunicación OPC entre el PLC y el SCADA

- PLC S7-300
- Cable Ethernet
- Multímetro
- Bananas para la conexión de los sensores y actuadores al PLC.
- Cinta aislante para evitar algún contacto indeseado en las bananas que genere un corto circuito.
- Conectores de la termocupla, RTD y Termistor

En la figura 1 se puede observar la planta en su totalidad

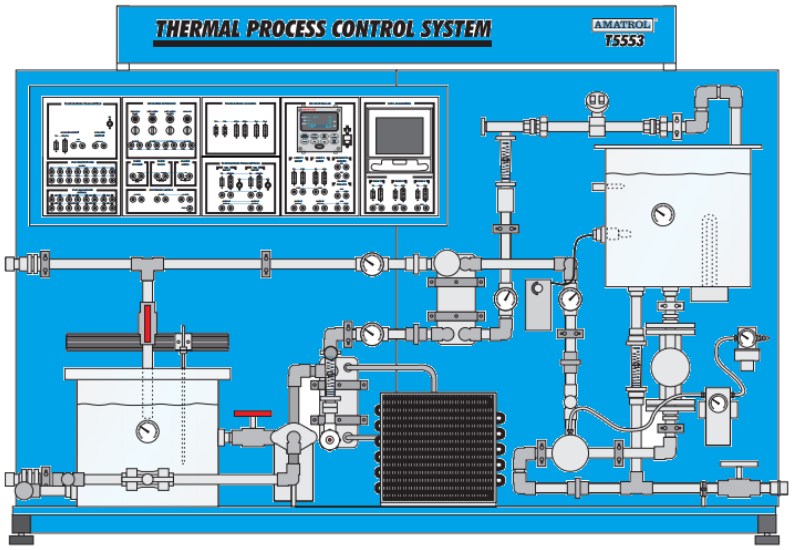


Figura 36.Planta de control de proceso T5553

Es necesario reconocer los elementos que la conforman, para ello se empezara con los sensores y actuadores de la misma, véase figuras 2-3.

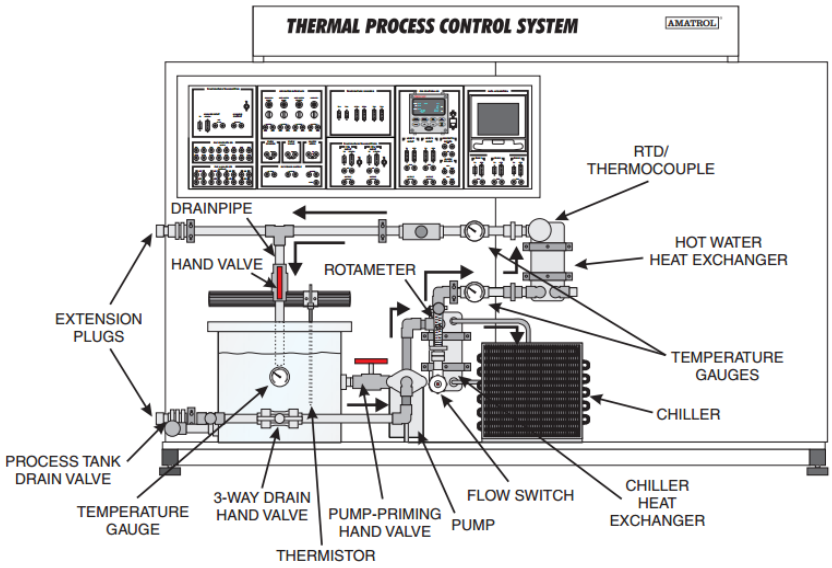


Figura 37. Sensores y actuadores lazo 1

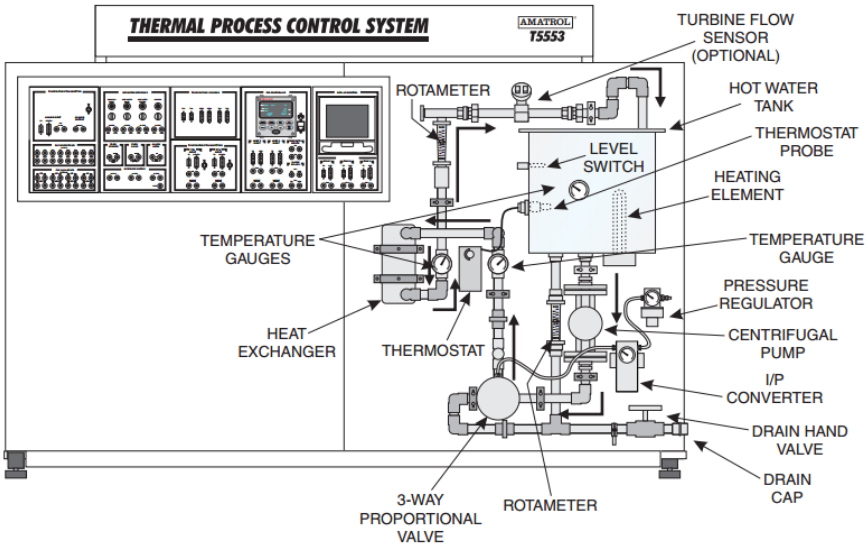


Figura 38. Sensores y actuadores lazo 2

Para entender de mejor manera su funcionamiento en la figura 4 se muestra el P&ID de la planta, en el cual se detallan los diferentes lazos que conforman el sistema de control térmico.

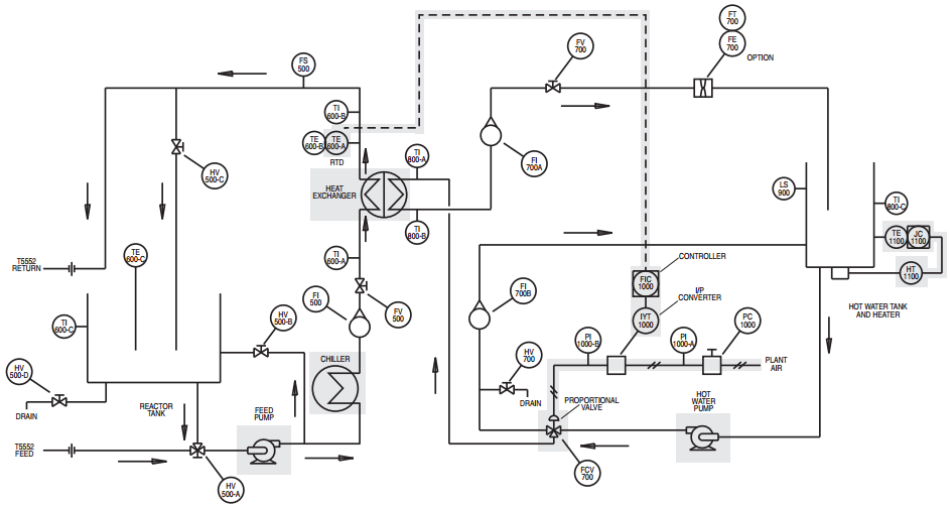


Figura 39.P&ID planta control de proceso T5553

En la figura 5 se puede observar los paneles de conexiones, la planta al ser didáctica posee varios métodos de funcionamiento, sin embargo, en este caso solo se usarán los paneles de entradas y salidas, ellos serán conectados al PLC S7-313C, en el cual se programó la rutina de control.

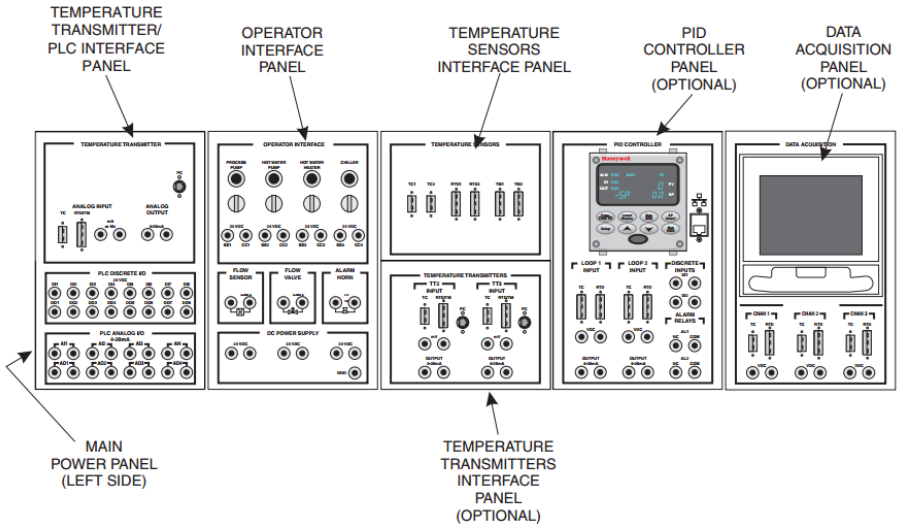


Figura 40.Paneles de la planta de control de proceso T5553

Se procede a realizar la activación manual y desactivación de la bomba de proceso, bomba de agua caliente, resistencia de inmersión y chiller o radiador (Solo es posible activarlo cuando la bomba de proceso está encendida), véase figura 6

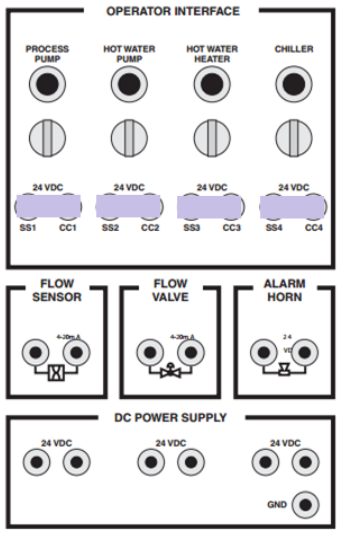


Figura 41.Panel de actuadores de la planta de control de proceso T5553

Tras de haber comprobado el funcionamiento de los actuadores se procede a identificar el panel de control de los sensores, véase figura 7, nótese que tienen incluido los transmisores en voltaje o en corriente(4-20mA) los cuales permiten el envío de datos al PLC, las prácticas fueron diseñadas transmisores 4-20 mA

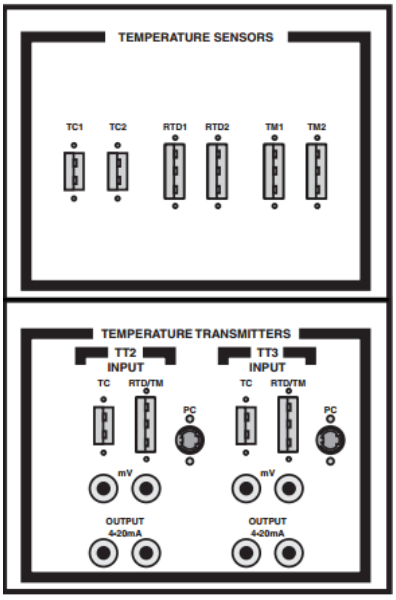


Figura 42. Panel de sensores de la planta de control de proceso T5553

Como ya se había mencionado el PLC S7-300 es usado para las prácticas por su fácil entorno de programación, el controlador ubicado en el laboratorio de control de la Universidad Distrital al ser de aprendizaje también posee paneles de entras y salidas análogas y digitales, además de contar con su propia fuente de voltaje de 24V, véase figura 8



Figura 43. Plataforma de aprendizaje PLC S7-300

PREPARACIÓN

Para realizar las prácticas el usuario debe conectar el circuito como lo muestran las figuras 9-10.

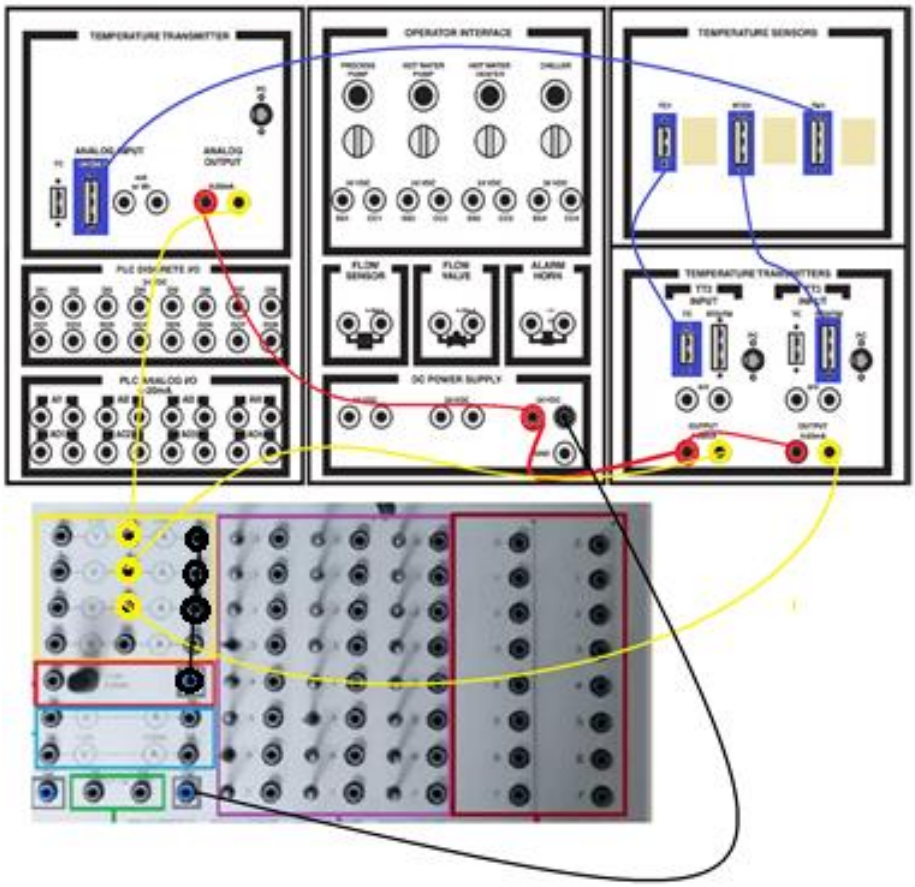


Figura 44. Conexión de los sensores al PLC

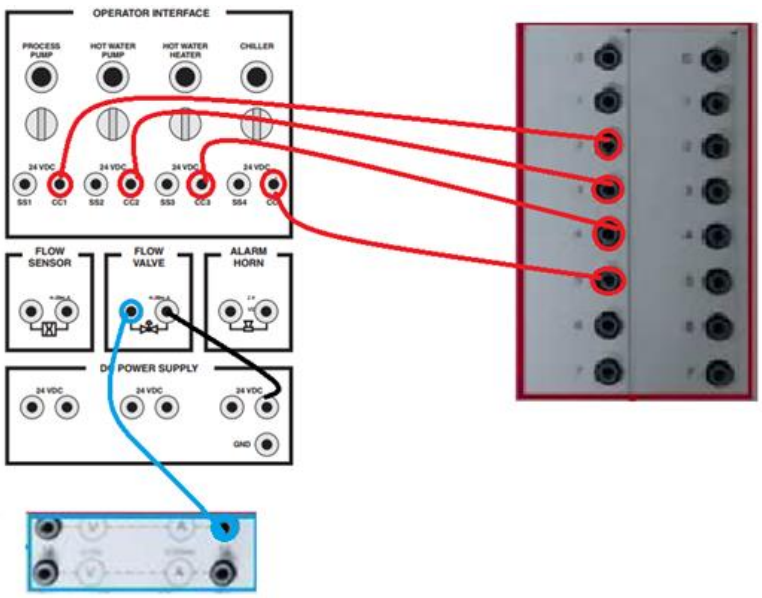


Figura 45. Conexión de los actuadores al PLC

Una vez realizado el montaje se dirige al archivo de TIA Portal llamado practica 1, se abre y se programa el PLC.

Una vez programado el PLC se ejecuta el NI OPC Server y se abre el archivo *"OPC_SIEMENS.OPF"*, véase figura 11

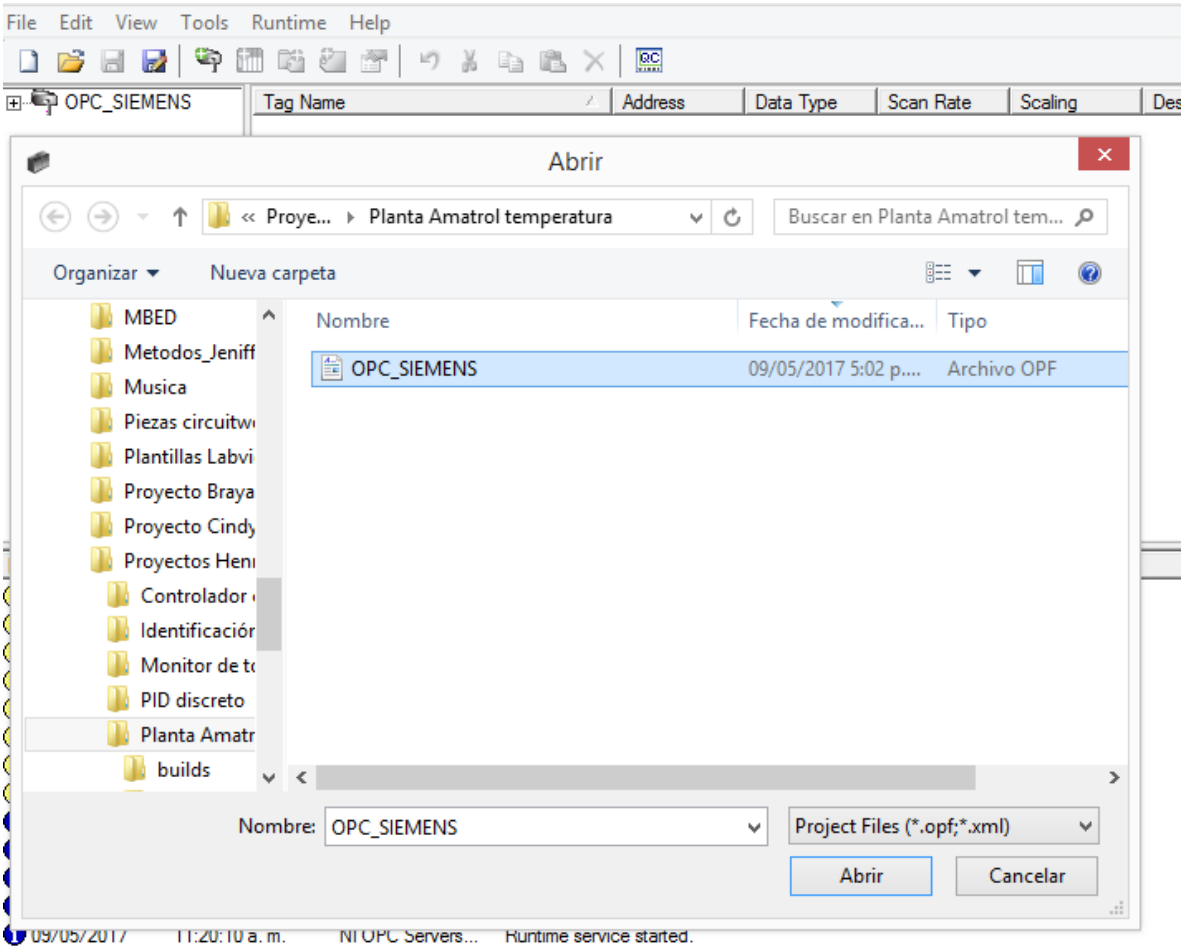


Figura 46. Interfaz NI OPC SERVER

Cargada la sesión para establecer la comunicación OPC se procede a ejecutar el archivo *"Planta.exe"*. El SCADA se encuentra dividido en 4 paneles donde se encuentran la ventana principal del proyecto, lectura de los sensores de temperatura, curvas de sensores - actuadores y el plano P&ID de la planta de proceso T5553, véanse figuras 12-15.

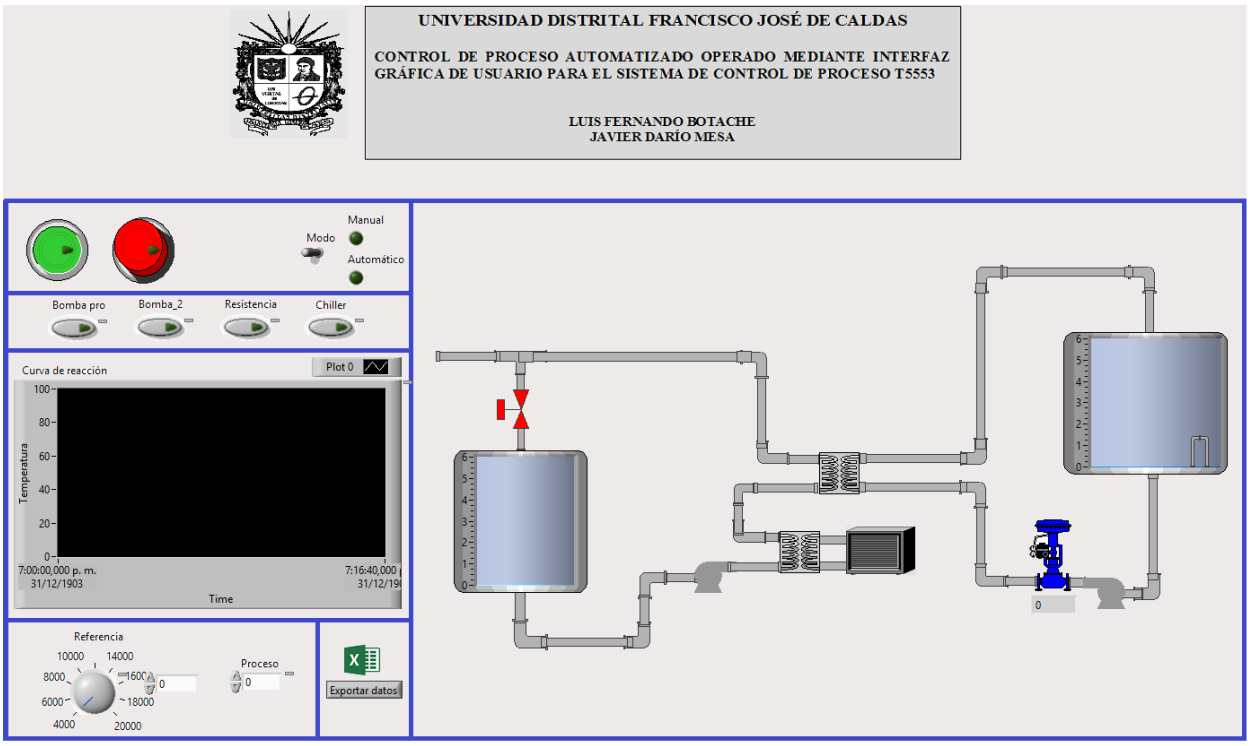


Figura 47, Ventana principal de SCADA

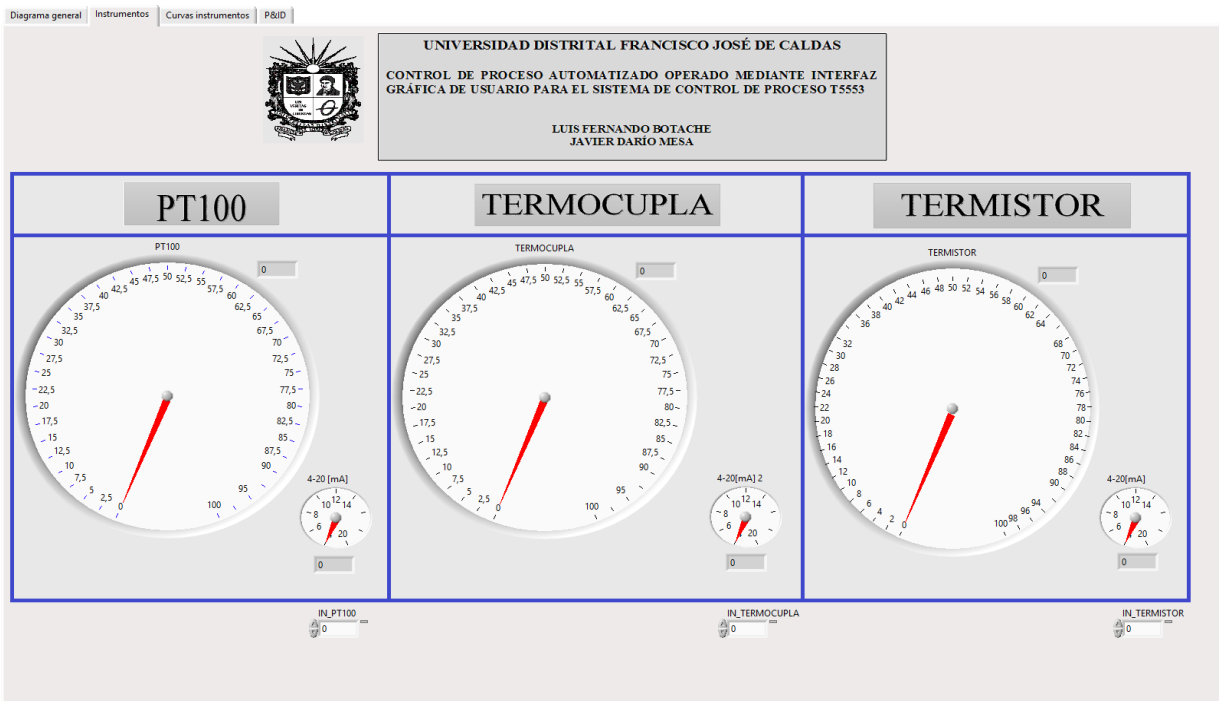


Figura 48. Lectura presente de los sensores



Figura 49. Curvas entradas y salida del sistema

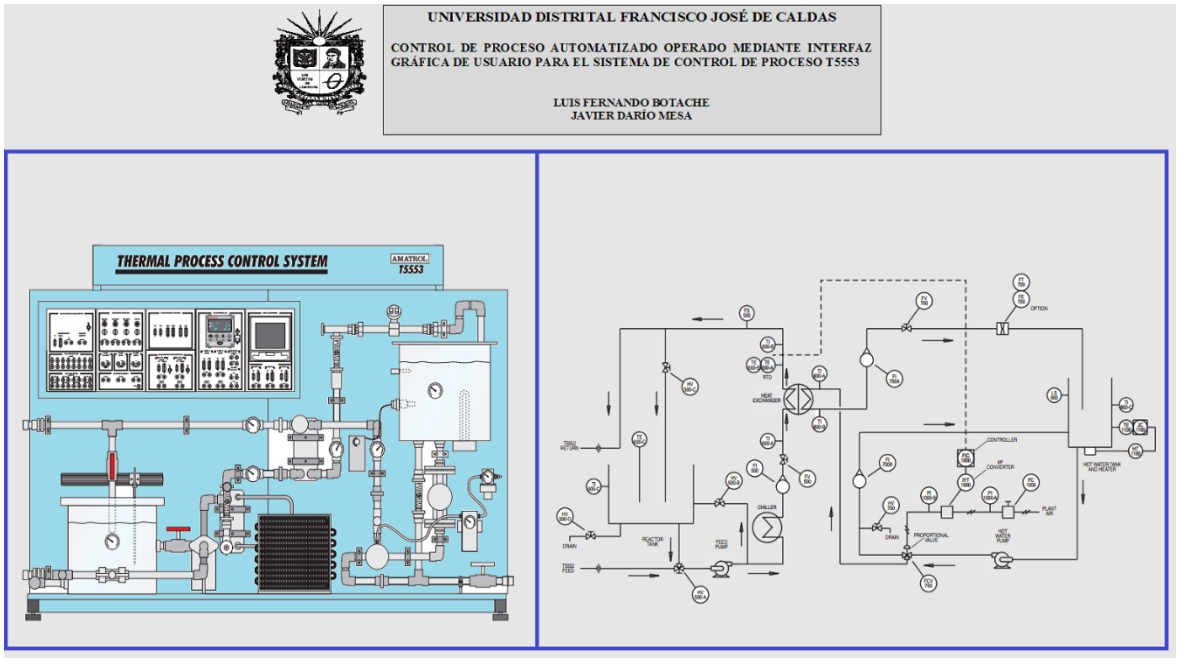


Figura 50. P&ID de la planta

PRACTICA 1

Objetivo

Reconocer los puertos de entrada y salida de la planta.

Procedimiento

Realizadas las conexiones descritas anteriormente proceda a realizar un programa en TIA PORTAL con el cual pueda controlar manualmente los activadores, y leer los datos de los sensores de temperatura, recuerde que dependiendo de la variable ocupa uno o más espacios de memoria.

Preguntas

1. ¿Qué sucede cuando no se respetan las posiciones de memoria?

2. ¿Por qué cree que el chiller no se activa si la bomba no está encendida?

3. Mida la salida la corriente del transmisor correspondiente a la termocupla y verifique que sea la misma del bloque “SCALER”.

PRACTICA 2

Objetivo

Encendido y apagado de los actuadores usando el SCADA con el fin de observar y analizar el comportamiento de la planta.

Procedimiento

Una vez realizado los pasos descritos en ítem “Preparación” se activa desde el software el proceso y se pulsan los botones correspondientes a cada actuador, tenga en cuenta que cada uno posee un tiempo muerto, en el caso de las bombas verifique en la planta el estado de los sensores de flujo comprobando que estén encendidas, en la interfaz se puede visualizar el estado de los actuadores ON-OFF verificando el color que poseen en el momento.

Diríjase a la planta y compruebe la correcta circulación de los fluidos, manualmente incremente la temperatura del fluido de proceso a 32°C, posteriormente reduzca la temperatura del fluido de proceso a la temperatura ambiente usando alguna de las funcionalidades de la planta, ¿Cómo lo haría?

Solución

Proceda a activar la resistencia de inmersión, a continuación, active la bomba de agua caliente y por último la bomba de proceso, véanse figuras 16-17.

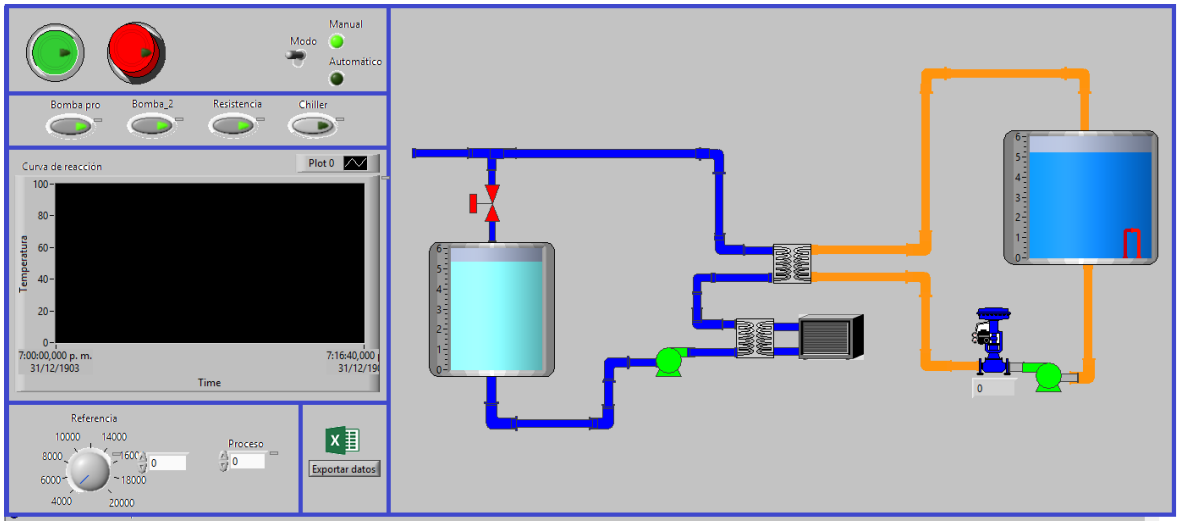


Figura 51. Incremento de la temperatura fluido del proceso

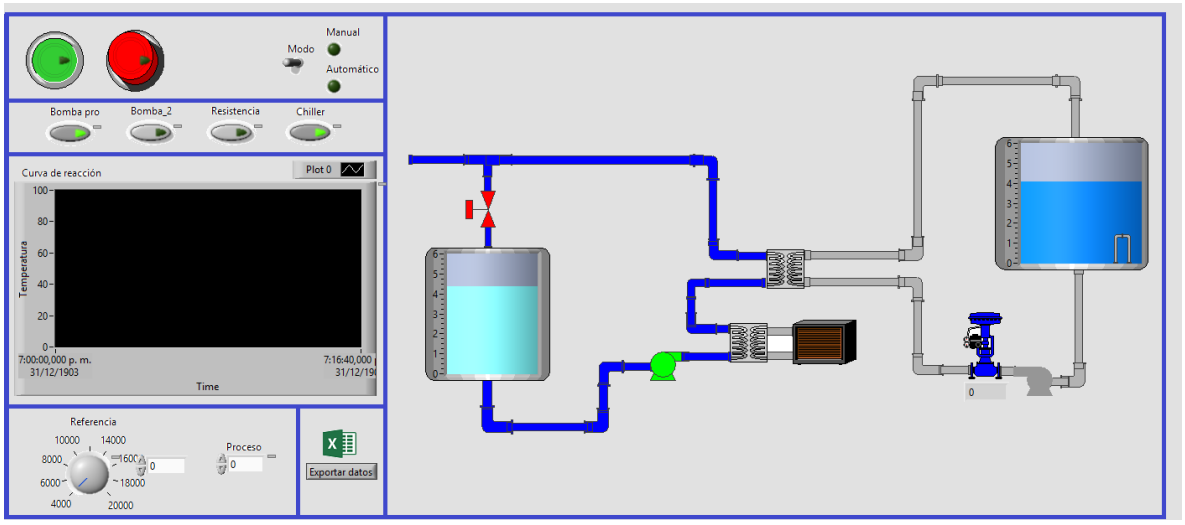


Figura 52. Decremento de la temperatura fluido del proceso

PRACTICA 3

Objetivo

Observar y analizar el desempeño de un controlador PID.

Procedimiento

Cargue el programa “proyecto 1” en el PLC, ingrese un setpoint de 45 °C para el fluido de proceso, calcule:

- Tiempo muerto
- Tiempo de subida
- Sobreimpulso

- Tiempo de estabilización
- Ventana de trabajo

Una vez se alcance la temperatura de 45°C proceda a cambiar el setpoint a 25°C, calcule los mismos ítems para el nuevo punto de consigna.