

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**APLICACIÓN DE UN ESQUEMA DE CONTROL AVANZADO EN UNA PLATAFORMA DE
EXPERIMENTACIÓN DE LA MARCA FESTO**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Julio Ismael Bravo Álvarez

Profesor Guía:

Ing. Guelis Montenegro Zamora

Este trabajo de título se lo dedico a mi familia, mis padres Verónica Álvarez y Julio Bravo y mis hermanos Bryan Bravo y Débora Bravo, quienes por ellos soy lo que soy, por su apoyo, comprensión, amor, la ayuda en los momentos difíciles y por los recursos necesarios para poder estudiar una carrera que me llena el alma. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir siempre mis objetivos aunque difíciles sean.

También gracias a la mejor amiga, compañera, pareja Valeria Carroza, por su amor, su entrega, comprensión, paciencia y ánimo, que fueron relevantes durante todo momento dentro de este proceso y por sobre todo cuando no veía la luz dentro del camino.

Por último a los profesores y compañeros, quienes me guiaron he hicieron ameno todo el proceso recorrido durante los tres años académico de la carrera.

RESUMEN

KEYWORDS: ESQUEMA DE CONTROL AVANZADO, CONTROL EN CASCADA, CONTROL PID, PLATAFORMA FESTO

En el presente trabajo de título se diseñará e implementará un control avanzado basado en el esquema de control en cascada con el fin de regular las variables de flujo y nivel, para la plataforma de experimentación de la marca FESTO que se encuentra en las dependencias del edificio M, en la Universidad Técnica Federico Santa María, en la sede Viña del Mar.

Se implementará el diagrama de control y graficarán el escalón de entrada y respuesta del sistema mediante los programas TIA Portal V14, OPC Server, Matlab y LabVIEW, respectivamente.

En el momento de efectuar las pruebas de control en la planta de experimentación, se apreciará las respuestas del sistema al ingresar en la entrada del esquema de control un punto de referencia o set point, y se aplicarán diversas perturbaciones para observar cómo se comporta el sistema que ayudaran a obtener las futuras conclusiones respecto de si el diseño de control generado regula eficientemente las variables con las que se trabajara y así promover el estudio de otra alternativa para un esquema de control en los procesos industriales.

ÍNDICE

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	2
1.1. LA UNIVERSIDAD	3
1.2. FESTO S.A.	5
1.3. ESTACIÓN DE TRABAJO COMPACTA	5
1.3.1. Sistemas de la Estación de Trabajo Compacta	6
1.3.1.1. Elementos del sistema eléctrico	8
1.3.1.2. Elementos del sistema mecánico	9
1.3.1.3. Elementos del subsistema de control de flujo	9
1.3.1.4. Elementos del subsistema de control de nivel	9
1.3.1.5. Elementos del subsistema de control de presión	10
1.3.1.6. Elementos del subsistema de control de temperatura	10
1.3.2. Funcionamiento de sistemas de control	10
1.3.2.1. Funcionamiento de control de flujo	10
1.3.2.2. Funcionamiento de control de nivel	11
1.4. SOFTWARE A UTILIZAR	11
1.4.1. TIA Portal V14	11
1.4.2. Matlab	12
1.4.3. LabVIEW	12
1.4.4. NI OPC server	13
1.5. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	13
1.5.1. Esquema de control - cascada	13
1.5.2. Estrategias de control - Controlador PID	15
1.6. OBJETIVOS	16
1.6.1. Objetivo general	16
1.6.2. Objetivos específicos	16
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE INGENIERÍA DE CONCEPTOS	18
2.1. ESTUDIO TÉCNICO DE ELEMENTOS A UTILIZAR EN PLANTA	19
2.1.1. Elementos del sistema eléctrico	19
2.1.1.1. PLC Siemens S7-1500	19
2.1.1.2. Pantalla HMI Siemens	22
2.1.1.3. Placa de conexión E/S	22
2.1.2. Elementos de control de flujo	23
2.1.2.1. Bomba centrífuga de agua	24
2.1.2.2. Sensor opto electrónico	24

2.1.2.3.	Válvula de Bola de dos vías con accionamiento rotativo neumático	24
2.1.2.4.	Compresor Hyundai	25
2.1.3.	Elementos de control de nivel	26
2.1.3.1.	Sensor ultrasónico	26
2.1.3.2.	Estanques	27
2.2.	ANÁLISIS DE ESQUEMA DE CONTROL EN CASCADA	27
2.2.1.	Diagrama P&ID de control de flujo y nivel	27
2.2.2.	Diagrama de bloques para el control de flujo y nivel	28
2.3.	LINEALIDAD DE LOS SISTEMAS	29
2.3.1.	Homogeneidad de las señales	31
2.3.2.	Superposición de las señales	32
2.3.3.	Punto de operación a trabajar	33
2.4.	OBTENCIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	33
2.4.1.	Programa de control en TIA Portal	35
2.4.2.	Conexión de PLC mediante un servidor vía NI OPC Server	37
2.4.3.	Obtención de mediciones con LabVIEW	38
2.4.4.	Linealización de los datos para trabajar en Matlab	40
2.4.5.	Aplicación de Ident en Matlab	41
2.4.5.1.	Función de transferencia de subsistema de flujo	41
2.4.5.2.	Función de transferencia de subsistema de nivel	42
2.4.5.3.	Ratificación de funciones de transferencia de flujo	43
2.4.5.4.	Ratificación de funciones de transferencia de nivel	43
2.5.	OBTENCIÓN DE CONTROLADORES	45
2.5.1.	Controlador de subsistema de flujo	45
2.5.2.	Controlador de subsistema de nivel	48
CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS		50
3.1.	SIMULACIÓN DE CONTROLADORES	51
3.1.1.	Simulación del control de flujo	51
3.1.2.	Simulación del control de nivel	53
3.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA EN CASCADA DENTRO DE PROGRAMA DE CONTROL	54
3.3.	IMPLEMENTACIÓN DE GRÁFICAS DE SEÑALES DE LAZOS DE CONTROL EN EL ENTORNO HMI	57
3.4.	ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CONTROL	58
3.4.1.	Prueba de nivel ideal con cambio de referencia	59
3.4.2.	Perturbaciones estables en estado estacionario	62
3.5.	EXPERIMENTACIÓN CON UN FILTRO EMA	64

3.6	OBSERVACIONES RESPECTO A LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	67
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
	BIBLIOGRAFÍA	69
	ANEXO A: PROGRAMACIÓN CPU S7-1516 EN LENGUAJE KOP	70
	ANEXO B: CONFIGURACIÓN DE RED PARA CONEXIÓN CON COMPUTADOR	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Figura 1-1 Edificio de sede José Miguel Carrera	4
Figura 1-2.	Ubicación de Sede Viña del Mar	4
Figura 1-3.	Estación de Trabajo Compacta FESTO	6
Figura 1-4.	Diagrama P&ID de la Estación Compacta FESTO	8
Figura 1-5.	Ejemplo de perturbaciones entrando a una línea de proceso	14
Figura 1-6.	Ejemplo de control en cascada	14
Figura 1-7.	Ejemplo de control en lazo cerrado	15
Figura 1-8.	Ejemplo de controlador PID en lazo cerrado	16
Figura 2-1.	CPU de PLC	20
Figura 2-2.	Fuente de poder de PLC	21
Figura 2-3.	Módulos utilizados en PLC	21
Figura 2-4.	HMI KTP600	22
Figura 2-5.	Placa de conexión E/S	22
Figura 2-6.	Disposición de elementos en placa de conexión	23
Figura 2-7.	Bomba de agua y sensor de flujo	24
Figura 2-8.	Válvula de dos vías	25
Figura 2-9.	Compresor de aire Hyundai	26
Figura 2-10.	Estanque de agua y sensor ultrasónico de nivel	26
Figura 2-11.	Diagrama P&ID de control de variables	27
Figura 2-12.	Diagrama de bloques de control de nivel y flujo	28
Figura 2-13.	Gráficos de flujo y nivel v/s actuación	30
Figura 2-14.	Gráfico de nivel v/s flujo	30
Figura 2-15.	Ejemplo homogeneidad	31
Figura 2-16.	Ejemplo superposición	32
Figura 2-17.	Punto de operación a trabajar	33
Figura 2-18.	Prueba de sensores	34
Figura 2-19.	Tabla de variables	35
Figura 2-20.	Segmentos de start y control de la bomba	36
Figura 2-21.	Segmento de medición de flujo y nivel	37
Figura 2-22.	Conexión PLC y servidor OPC	38
Figura 2-23.	Panel frontal de LabVIEW	38
Figura 2-24.	Diagrama de bloques en LabVIEW	39
Figura 2-25.	Gráficos de sistemas de nivel y flujo	39
Figura 2-26.	Visualización de datos a utilizar en Matlab	40
Figura 2-27.	Panel de Identificación de sistemas	41
Figura 2-28.	Modelo de procesos para identificación de función de transferencias	41

Figura 2-29.	Modelado de flujo	43
Figura 2-30.	Modelado de nivel	44
Figura 2-31.	Bloque PID_Compact dentro de TIA Portal	48
Figura 2-32.	Configuración del controlador Pi de nivel	49
Figura 3-1.	Lazo cerrado del sistema de flujo	52
Figura 3-2.	Respuesta de la simulación del sistema de flujo	52
Figura 3-3.	Lazo cerrado simple de subsistema de nivel	53
Figura 3-4.	Respuesta de la simulación del sistema de nivel	53
Figura 3-5.	Orden de bloques PID_Compact dentro de programa de control	54
Figura 3-6.	Bloques de relación entre PID de nivel y flujo	56
Figura 3-7.	Esquema de control en cascada con bloques PID_Compact	56
Figura 3-8.	Imagen de elección de control para pantalla HMI	57
Figura 3-9.	Imagen de set point de control en cascada para pantalla HMI	58
Figura 3-10.	Imagen de visualización de señales para pantalla HMI	58
Figura 3-11.	Prueba de funcionamiento de PI lazo simple	60
Figura 3-12.	Prueba de funcionamiento PI en esquema cascada	60
Figura 3-13.	Comparación de funcionamientos de motor	61
Figura 3-14.	Prueba de funcionamiento PI en cascada de la variable de flujo.	62
Figura 3-15.	Válvula V104 utilizada para generar perturbaciones.	62
Figura 3-16.	Prueba de perturbación estable en control PI de nivel de lazo cerrado simple.	63
Figura 3-17.	Prueba de perturbación estable en control en cascada.	63
Figura 3-18.	Filtro EMA.	65
Figura 3-19.	Filtro EMA implementado en señal de sensor	65
Figura 3-20.	Comparación de nivel con sin filtro v/s con filtro Ema.	66
Figura 3-21.	Comparación de flujo con sin filtro v/s con filtro Ema	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Datos técnicos de estación de trabajo	7
Tabla 2-1.	Datos de pruebas de escalones de actuación	29
Tabla 2-2.	Datos de pruebas de homogeneidad	31
Tabla 2-3.	Datos de pruebas de superposición	33
Tabla 2-4.	Fórmulas de sintonización criterio Cohen Coon	47
Tabla 3-1.	Escala para bloque PID de nivel	55
Tabla 3-2.	Datos para la relación de nivel y flujo	55

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

AI	: Analog Input (Entrada análoga).
AQ	: Analog Output (Salida Análoga).
CPU	: Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento).
DI	: Digital Input (Entrada Digital).
DQ	: Digital Output (Salida Digital).
E/S	: Entradas y Salidas.
EE.UU.	: Estados Unidos.
G9	: Red de universidades públicas no estatales.
HMI	: Human Machine Interface.
NO	: Normalmente Abierto.
P&ID	: Diagrama de tuberías e instrumentación.
PID	: Proporcional, Integral y Derivativo.
PLC	: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).
PT100	: Tipo de sensor de temperatura.
UTFSM	: Universidad Técnica Federico Santa María.
VAC	: Voltaje Corriente Alterna.
VDC	: Voltaje Corriente Continua.

B. SIMBOLOGÍA

°C	: Grados Celsius.
Bar	: Unidad de Presión.
Hz	: Hertz (unidad de frecuencia).
Kpa	: Kilo pascales.
L/ máx.	: Litros Máximos.
L/min	: Litros por minuto.
mA	: Mili Amperes.
mm.	: Milímetros.
V	: Voltaje.
W	: Watts.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto contempla el desarrollo de un control de flujo y nivel mediante un esquema de control en cascada de una planta de procesos marca FESTO, a través de herramientas como Matlab, NI OPC Server, TiaPortal y el gráfico de la respuesta mediante LabVIEW.

El trabajo de título es desarrollado a través de un proyecto entregado por el profesor Guelis Montenegro, profesor de la UTFSM - Sede José Miguel Carrera con fin de poder reforzar lo aprendido durante las clases, tanto como la formación técnica como la ingeniería utilizada en la planta de procesos y optar al título de Ingeniero de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial.

El proyecto contempla cuatro ejes principales: El realizar un estudio detallado de la instrumentación de la planta, obtener la función de transferencia de los sub sistemas, diseñar un controlador para el sub sistema de flujo y nivel bajo un punto de operación y por último, la medición y gráfica de los resultados obtenidos mediante LabVIEW.

Los capítulos presentados en este trabajo son tres, el primer capítulo presenta los antecedentes generales, el cual describe detalles de la institución donde se encuentra la planta de procesos, características técnicas de cada sistema, softwares a utilizar, conceptos que se pretenden implementar y objetivos del presente proyecto. El segundo capítulo se basa en todo el desarrollo de ingeniería del trabajo, se detallan los elementos que se utilizaran, se desarrollan los conceptos del esquema de control en cascada se relata cómo se obtienen el punto de operación a trabajar, la linealización de los sistemas, la obtención de las funciones de transferencia y los controladores de cada sistema. Por último el tercer capítulo consta de las simulaciones de los controladores, la implementación del esquema en cascada dentro del PLC, pruebas del control en cascada comparándolo con un control en lazo cerrado simple PID y habla de los resultados obtenidos a través de las pruebas a realizar.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. ANTECEDENTES GENERALES

En el correspondiente capítulo se da a conocer las características de la plataforma experimental FESTO, el esquema de control en cascada, los softwares que se usarán, se analizará un controlador continuo PID, y se detallarán los diferentes elementos que constituyen la plataforma que se utilizará para este trabajo de título

1.1. LA UNIVERSIDAD

La Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) es una Universidad tradicional privada, perteneciente al Consejo de Rectores de las Universidades Chilenas, a la Agrupación de Universidades Regionales de Chile, a la Red Universitaria Cruz del Sur y a la Red Universitaria G9. Fue fundada el 20 de diciembre de 1931 por la voluntad testamentaria del filántropo Federico Santa María Carrera, quién legó su fortuna para dotar al país de una institución que entregue una formación humana, científica y profesional centrada en principios y valores universales, liderando en la enseñanza de la ingeniería, ciencia y tecnología.

El objetivo de la Universidad es formar profesionales que posean herramientas para liderar equipos y desarrollar iniciativas creativas e innovadoras y sean sensibles a su entorno sociocultural, complementando su excelencia y competencia en sus respectivas disciplinas. Así cada nueva generación está llamada a engrandecer el legado heredado de don Federico Santa María Carrera.

La casa de estudios imparte programas en Ingeniería, Ciencias Básicas y Arquitectura, así como múltiples programas de Magister y programas de Doctorado en Matemática, Física, Química, Biotecnología, Ingeniería Informática, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica. Actualmente posee aproximadamente un total de 19 mil estudiantes distribuidos en 5 campus y 2 sedes, las cuales la mayoría se encuentra a lo largo del país, comenzando con su casa central ubicada en Valparaíso, dos campus en la región metropolitana, una localizada en Vitacura y otra en San Joaquín, una oficina en Rancagua, el último campus en Guayaquil, Ecuador. Sus dos sedes se encuentran en Concepción y la última, donde está ubicada la planta FESTO utilizada en este trabajo de título, se encuentra en Viña del Mar conocida como sede José Miguel Carrera.

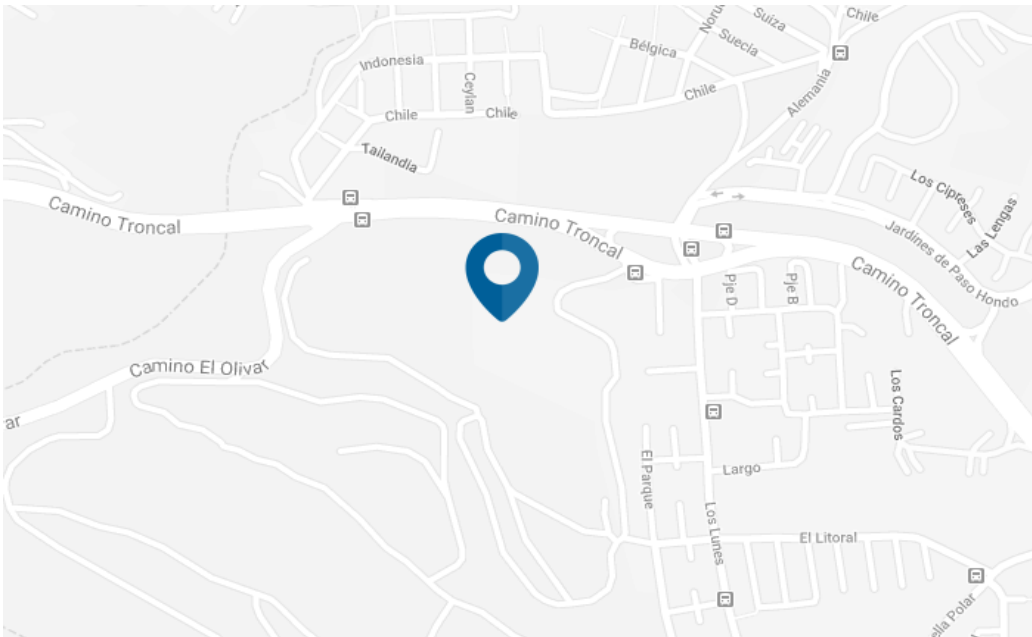
A continuación, en la figura 1-1 se muestra la sede José Miguel Carrera.



Fuente: https://live.staticflickr.com/7376/9318765437_721d1ea524_b.jpg.

Figura 1-1 Edificio de sede José Miguel Carrera.

La sede José Miguel Carrera está ubicada exactamente en Avenida Federico Santa María N°6090, en el límite entre las comunas de Viña del Mar y Quilpué (ver Figura 1-2). Esta sede se construye y se equipa en 1972 gracias a la colaboración de la Fundación Ford, la asesoría del Dunwoody Industrial, instituto de los EE.UU. y la donación de los terrenos por parte de Indap.



Fuente: <http://www.vinadelmar.usm.cl/universidad/sede/historia-2/>

Figura 1-2. Ubicación de Sede Viña del Mar.

La sede de Viña del Mar tiene como gran característica los diferentes talleres y laboratorios que posee cada especialidad o área que componen esta institución.

A lo largo del tiempo las distintas carreras se han esmerado por el aprendizaje práctico de sus estudiantes añadiendo maquinaria, equipos y plataformas didácticas que los alumnos, tienen la oportunidad de crear y desarrollar pequeños y grandes proyectos, complementando así, el saber con el hacer, esto con la continua ayuda de los respectivos profesores. Estos proyectos traen un beneficio tanto para el estudiante como para la institución.

En el edificio M de la sede, donde se imparten clases y laboratorios del área de control, electrónica y telecomunicaciones se pueden encontrar una gran variedad elementos y materiales de aprendizaje, como simples resistencias, leds, protoboards y condensadores hasta los elementos más complejos como PLC, pantallas HMI o variadores de frecuencias, que son dispositivo utilizado en la industria moderna con el fin controlar procesos industriales. Es justamente en este edificio en que se encuentra la Estación de Trabajo Compacta de la marca FESTO, que emula un proceso Industrial.

1.2. FESTO S.A.

FESTO S.A. es una empresa internacional que asesora, desarrolla e implementa equipos de automatización industrial y elabora y dicta capacitaciones en tecnologías de automatización, tanto en el segmento industrial como educacional, además de la comercialización de equipamiento para la educación como la Estación de Trabajo Compacta que fue adquirida por la Sede de Viña del Mar, en el año 2010.

Esta empresa fue fundada en Esslingen, Alemania hace más de 80 años y está presente en más de 55 países en todo el mundo. En Chile comenzó sus operaciones en el año 2001, estando presente en todo el país entre Arica y Punta Arenas.

1.3. ESTACIÓN DE TRABAJO COMPACTA

La Estación Compacta de Trabajo FESTO es una plataforma experimental didáctica de aprendizaje, esta está diseñada para facilitar la formación y perfeccionamiento de alumnos y trabajadores del área de automatización industrial. Consiste en el control de cuatro variables físicas correspondientes a: flujo, nivel, presión y temperatura mediante un PLC, en este caso el Siemens S7-1500 modelo 1516-3 PN/DP. Cada variable se puede controlar de forma individual o en conjunto, semejándose a un proceso industrial real.

Este sistema está orientado para ayudar a potenciar las distintas competencias de los usuarios, como las sociales, técnicas y metodológicas, por medio del fortalecimiento de conocimientos técnicos, operacionales y gestionar el trabajo en equipo, fomentando la disposición a cooperar y la capacidad de organización. Asimismo, los usuarios que tienen acceso a esta herramienta pueden practicar las fases reales de un proyecto, por ejemplo: la planificación, la programación, la puesta en marcha, la operación, el mantenimiento y la localización de averías.

A continuación se presenta en la figura 1-3, la estación de trabajo compacta.



Fuente: Elaboración propia desde laboratorio M-203, en dependencias de UTFSM.

Figura 1-3. Estación de Trabajo Compacta FESTO.

1.3.1. Sistemas de la Estación de Trabajo Compacta

Con el fin de poder comprender el funcionamiento de la estación de trabajo compacta se procede a dividir sus componentes en diferentes sistemas, los cuales son:

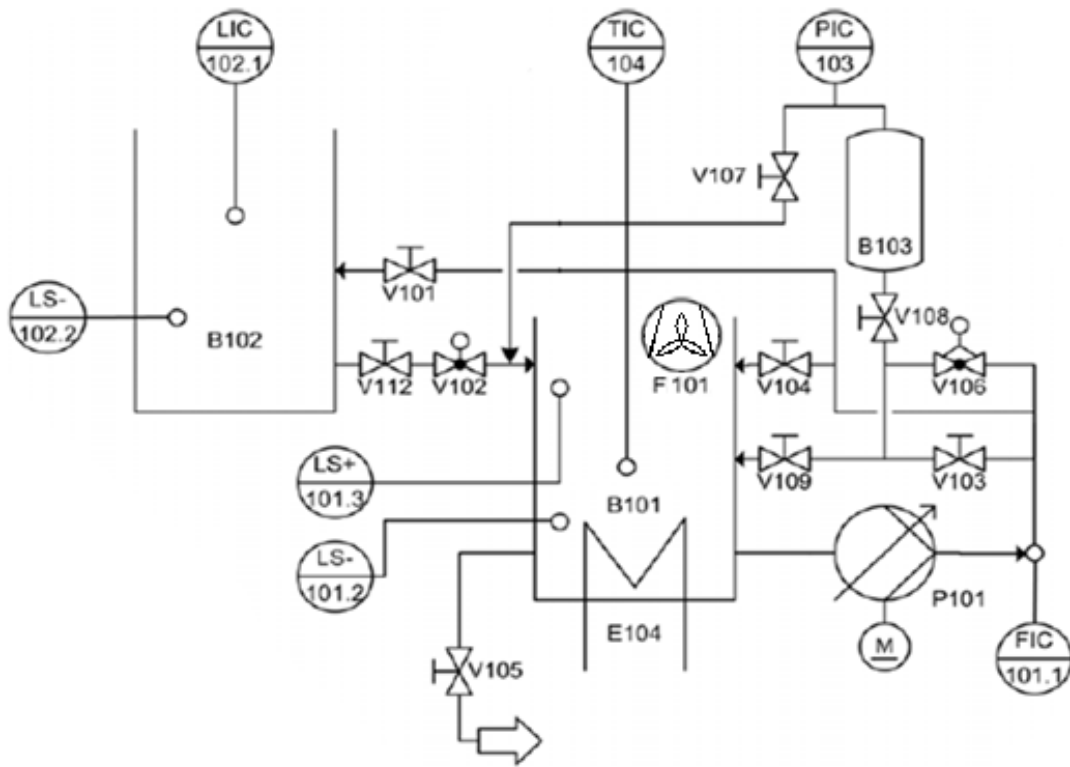
- Sistema eléctrico de control: Este sistema contiene el cableado, el tablero de entradas y salidas de cada sistema de control de variables, el controlador lógico programable y la pantalla HMI.
- Sistema de suministro mecánico: este sistema contiene todos los elementos mecánicos que se adhieren al circuito de tuberías, los estanques y la unidad de servicio neumática.
- Sistemas de control de variables: estos sistemas se dividen en cuatro lazos de control compuesto por sensores digitales y análogos, que son los encargados de medir los cambios físicos ejercidos en el líquido como perturbaciones que se enviarán como una señal normalizada al PLC, los actuadores los cuales se ocupan de la regulación de las variables físicas dependiendo del comportamiento de los sensores. En la tabla 1-1 se pueden apreciar los parámetros básicos de la estación de trabajo compacta.

Tabla 1-1. Datos técnicos de estación de trabajo.

Parámetros		Valor
Presión máxima de operación de las tuberías		50 Kpa /0.5bar.
Fuente de alimentación para la estación		24 VDC.
Dimensiones placa de perfil		7000x 700 x32 mm.
Caudal de la bomba		10 L/min.
Volumen de tanque		12 L máx.
Sistema de tuberías flexibles		Ø 15mm.
Entradas digitales		7
Salidas digitales		5
Entradas analógicas		4
Salidas analógicas		2
Cantidad de taques		3
Rango de salida de elementos de control	Bomba (0-24 VDC)	0 - 10 V.
	Válvula proporcional 2/2W	0 - 10 V.
	Calefactor 230 VAC	On /Off 24 VDC.
Rango de trabajo de sistema de control de nivel		0 - 350 mm.
Rango de medición de sensor de nivel		50 - 300 mm.
Señal de salida de sensor de nivel		4 - 20 mA.
Rango de trabajo de sistema de control de flujo		0 - 7 l/min.
Rango de medición de sensor de flujo		0.3 - 9.0 l/min.
Señal de salida de sensor de flujo		0 - 1200 Hz.
Rango de trabajo de sistema de control de temperatura		0 - 60° C.
Rango de medición de sensor de temperatura		- 50° - 150 ° C.
Señal de salida de sensor de temperatura		Termocupla PT100.
Rango de trabajo de sistema de control de presión		0 -30 Kpa / 0 -300 mbar.
Rango de medición de sensor de presión		0 -10 Kpa / 0 -100 mbar.
Señal de salida de sensor de presión		0 - 10 V.

Fuente: Manual PCS Compact Workstation.

Para la identificación más sencilla de cada instrumento es necesario un diagrama P&ID, como se muestra en la Figura 1-4. Este diagrama es una representación gráfica del proceso de la estación FESTO, incluyendo todos los equipos mecánicos, sus interconexiones, válvulas, instrumentación y lazos de control, esta es una forma más simple de representar todos estos elementos, ya que normalmente en terreno se puede encontrar con procesos de gran envergadura y con una variada cantidad de materiales e instrumentos que conforman dicha instalación, con este tipo de diagrama se pueden identificar todos los elementos de una manera sencilla y poder tener una idea de las condiciones de diseño en cualquier proyecto de ingeniería.



Fuente: Manual PCS Compact Workstation.

Figura 1-4. Diagrama P&ID de la Estación Compacta FESTO.

Los segmentos de control de variables se pueden trabajar de forma individual o en forma simultánea dependiendo del tipo de esquema de control que se quiera utilizar y qué variables se deseen regular, estos segmentos se pueden dividir en:

- Control de caudal o flujo.
- Control de nivel.
- Control de temperatura.
- Control de presión.

1.3.1.1. Elementos del sistema eléctrico

Los elementos principales que se utilizan en el sistema eléctrico para el control de todas las variables son los siguientes:

- Controlador lógico programable (PLC) Siemens modelo S7 – 1500, CPU – 1516-3 PN/DP, con cuatro módulos:
 - Entradas digitales: DI 32x24 VDC HF.
 - Salidas digitales: DQ 32x24 VDC/0.5A HF.
 - Entradas análogas: 8XU/I/RTD/TC ST.
 - Salidas análogas: 4XU/I ST.
- Pantalla HMI Siemens.
- Panel de control.

- Transmisores de corriente a voltaje para sensor ultrasónico analógico.
- Transmisor de frecuencia a voltaje para sensor de presión piezorresistivo.
- Transmisor de sensor de temperatura PT100 a voltaje 0 - 10 V.
- Placa de conexión E/S con transformador de medición.
- Regulador de motor.
- Compresor de aire Hyundai de 230V - 2HP y capacidad de 24L para válvula de bola V102.

1.3.1.2. Elementos del sistema mecánico

A continuación se mencionarán los elementos mecánicos y de conexión entre los diferentes estanques que se utilizaran en el control:

- Válvulas manuales
- Estanque de agua B101
- Estanque de agua B102
- Estaque presurizado B103
- Válvula de bola manual para drenaje
- Unidad de servicio neumática
- Tuberías de conexión

1.3.1.3. Elementos del subsistema de control de flujo

Para poder realizar la regulación del flujo de agua se utilizan los siguientes sensores y actuadores

- Válvula proporcional de 24 VDC/0.5 W, con módulo de control el de 0 - 10 VDC.
- Sensor de flujo con señal de frecuencia de 24 VDC con una señal de salida de 40 - 1200Hz.

1.3.1.4. Elementos del subsistema de control de nivel

Para controlar el nivel del agua en los estanques se utilizan los siguientes sensores y el actuador:

- Bomba centrífuga de 24 VDC/ 26W, con un controlador de 0 - 10 VDC.
- Sensor ultrasónico analógico de 24 VDC con una salida de 4 – 20 mA.
- 2 Sensores capacitivos de proximidad, para máximo y mínimo nivel de agua normalmente abiertos (NO), con un rango de operación de 10 - 55 VDC.
- Interruptor flotador electromecánico.

1.3.1.5. Elementos del subsistema de control de presión

El control de presión en esta planta de procesos se obtiene mediante los siguientes elementos:

- Sensor de presión, piezorresistivo de 0 - 100 mbar con señal de salida de 0 - 10 VDC.
- Manómetro de rango 0-1 bar.
- Válvula de bola de proceso que posee accionamiento giratorio neumático con caja de sensores.
- Válvula solenoide 2/2 de 24 VDC von un rango de presión de 0-0.5 bar.

1.3.1.6. Elementos del subsistema de control de temperatura

La temperatura es regulada gracias a los siguientes instrumentos:

- Sensor de temperatura PT100 con rango de medición de -100° a 200° C.
- Calefactor de 1000W / 230 VAC, con relé de control integrado de 24 VDC.
- Ventilador Silencio FP 120 de 12VDC /1.92W

1.3.2. Funcionamiento de sistemas de control

El objetivo de los sistemas es mantener el control de las distintas variables que se pueden trabajar en la planta de procesos FESTO, anteriormente se segmentaron los sistemas por cada variable a regular, dando como resultado el conocer en cierta medida cómo trabaja cada elemento, ya sea instrumentos de medición, actuadores, transmisores, etc...

A continuación se describirá el trabajo de cada sistema que se utilizará por separado.

1.3.2.1. Funcionamiento de control de flujo.

El fin del control de flujo es regular el paso del agua a través de las tuberías impulsadas por la bomba (P101), se inicia cuando el agua pasa a por el sensor opto-electrónico infrarrojo que es guiada a la cámara de medición y luego dirigida a la cámara del rotor para su impulsión por las tuberías hacia el estanque. Ya que la velocidad del rotor es proporcional a la velocidad de flujo, se puede detectar por el trabajo del sensor midiendo las revoluciones de las paletas del rotor del sensor.

Ya que se tiene la medición se puede controlar el caudal, el cual se puede realizar de dos formas, la primera es el control del paso del agua controlando la velocidad de la bomba de agua con el controlador incorporado a esta, disminuyendo o aumentando su voltaje y por ende sus revoluciones por minuto cuando se requiera. La segunda forma de control es mediante la

válvula proporcional, regulando su apertura induciendo un voltaje en ella, permitiendo o reduciendo el paso del agua a través de las tuberías.

Este sistema tiene una válvula manual, la cual es V104, que al abrir o cerrar el paso del líquido genera perturbaciones en el lazo de control, esto sirve para poder verificar si el control es efectivo o no.

1.3.2.2. Funcionamiento de control de nivel

El objetivo de este sistema es el de controlar el nivel del estanque superior, mediante la misma bomba que se utilizaba para el control de flujo. Ya que esta planta posee dos estanques de agua, el estanque inferior B101, el cual es el contenedor de líquidos y entrega el agua al estanque superior B102 que es el receptor.

El control del llenado del estanque superior es mediante un sensor ultrasónico análogo, el cual envía una señal de corriente normalizada de 4 – 20 mA al transmisor de nivel, que transforma la corriente enviada por el sensor a una señal de voltaje igualmente normalizada de 0 – 10 V, para que el PLC pueda trabajar con la medición.

Al momento de ir llenando el estanque superior se puede controlar el flujo y llenar hasta los litros deseados, se puede abrir y cerrar la válvula de bola para cerrar el circuito de agua y dejar pasar el líquido del estanque superior al inferior, en caso de que se vacíe el estanque inferior por el sensor capacitivo inferior, detectará la falta de agua y debe parar el llenado del estanque superior.

1.4. SOFTWARE A UTILIZAR

En esta sección se detallarán todos los softwares que se utilizarán para poder realizar la implementación del control de procesos en la planta FESTO para este trabajo de titulación.

1.4.1. TIA Portal V14

TIA o Totally Integrated Automation es el sistema de ingeniería que permite configurar todos los procesos de planificación y producción. Ofrece un entorno de ingeniería unificado para todas las tareas de control, visualización y accionamiento.

El software TIA Portal incorpora las últimas versiones de Software de Ingeniería SIMATIC STEP 7, WinCC y Startdrive para la planificación, programación y diagnóstico de todos los controladores SIMATIC, pantallas de visualización y accionamientos SINAMICS de última generación.

Este es el software que se utilizará para realizar la programación con el fin de controlar las variables de la planta de procesos, en el hardware del controlador lógico programable, modelo S7-1500.

1.4.2 Matlab

MATLAB (matrix laboratory) es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente.

Este software dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializado, denominado Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria.

Con este programa se realizarán los cálculos pertinentes para poder obtener la función de transferencia de cada lazo, así poder generar el controlador más adecuado para la regulación de las variables.

1.4.3. LabVIEW

LabVIEW de National Instruments es un Entorno de desarrollo integrado especializado en informática industrial y científica. Su particularidad es que se basa en el lenguaje G (G por Gráfico). Permite el desarrollo de programas informáticos complejos facilitando al mismo tiempo la programación y en consecuencia disminuir los plazos de desarrollo. Gracias a sus librerías de funciones dedicadas a la adquisición de datos, la instrumentación, al análisis matemático de las mediciones y la visualización, LabVIEW se dedica especialmente a los bancos de pruebas y mediciones.

Con este software no se programa escribiendo líneas de códigos con una sintaxis compleja. La programación se hace con iconos que representan funcionalidades, ligados entre ellos por cables, quienes representan los flujos de datos.

Este programa se utilizará para graficar las respuestas de la planta cuando se inserte un escalón en la entrada del lazo cerrado y se procederá a recrear perturbaciones con el fin de observar si los controladores son eficaces en su trabajo.

1.4.4. NI OPC Server

El software OPC Server es una aplicación que cumple con una o más especificaciones definidas por la OPC Foundation. Este servidor hace de interfaz comunicando por un lado con una o más fuentes de datos utilizando sus protocolo nativos (típicamente PLCs, DCSs, básculas, módulos I/O, controladores, etc.) y por el otro lado con Clientes OPC (típicamente SCADAs, HMIs, generadores de informes, generadores de gráficos, aplicaciones de cálculos, etc.). En una arquitectura Cliente OPC/ Servidor OPC, el Servidor OPC es el esclavo mientras que el Cliente OPC es el maestro. Las comunicaciones entre el Cliente OPC y el Servidor OPC son bidireccionales, lo que significa que los Clientes pueden leer y escribir en los dispositivos a través del Servidor OPC.

En este caso se conectará la CPU del PLC de la planta de procesos mediante un servidor OPC al software LabVIEW, con el fin de obtener los datos que se utilizarán en Matlab para obtener las distintas funciones de transferencias.

1.5. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Ya que el tema abordado no tiene un problema específico al cual poder realizar un estudio de la solución más factible, debido a que es un trabajo de investigación aplicada, para poder reforzar aspectos pasados durante la carrera, se procede a realizar un estudio de conceptos sobre los puntos planteados en los objetivos del proyecto como el tipo de controlador a utilizar, el esquema de control que se desea aplicar y las variables físicas a regular para proceder con los objetivos y al desarrollo de la ingeniería, con el fin de obtener resultados haciendo pruebas al introducir perturbaciones al lazo de control.

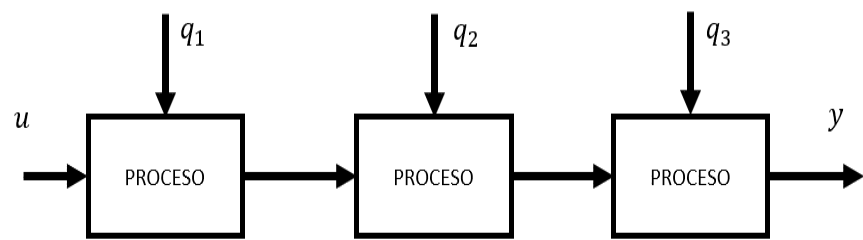
1.5.1. Esquema de control - cascada

Hay distintos esquemas de control que se pueden utilizar dependiendo del proceso que se desea controlar, Algunos esquemas de control son:

- Control con pre alimentación de la perturbación (Feedforward).
- Control en cascada.
- Control selectivo (override).
- Control de relación
- Control “Dúplex” o control de rango partido
- Entre otros...

Como este trabajo expondrá un control en cascada de las variables de flujo y nivel se tratará más detalladamente sobre este esquema de control.

El control en cascada es un esquema de control que hace uso de una forma eficiente el diseño y de cualquier estructura de control realimentado. Para poder comprender mejor este tipo de control, suponga que un proceso industrial está dividido en etapas, por donde la variable principal a que se desea regular va transitando por dichas etapas, solo que, en cada fase de este proceso, puede aparecer alguna perturbación que afectaría en gran medida el control de la variable principal, como lo vemos en la figura 1-5:

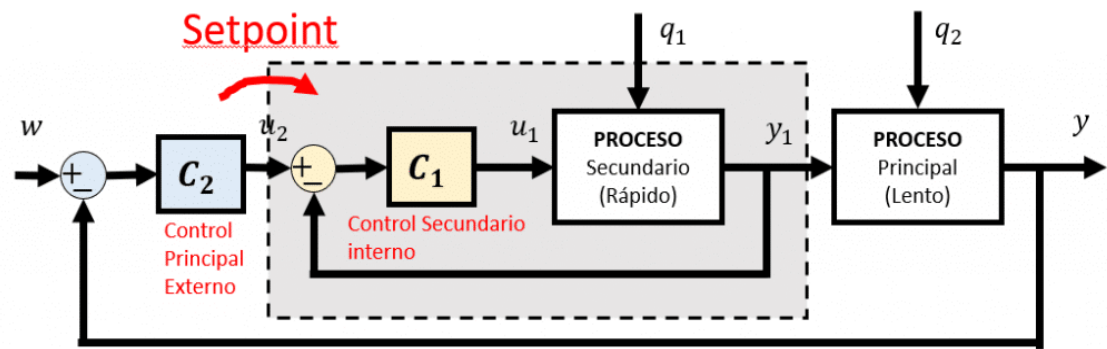


Fuente: <https://controlautomaticoeducacion.com/wp-content/uploads/Proceso-Control-en-Cascada>.

Figura 1-5. Ejemplo de perturbaciones entrando a una línea de proceso.

De la figura 1-5, se intuye que sería conveniente poder medir alguna de esas perturbaciones antes de que estas afecten la variable principal. Adicionalmente, se puede intuir que entre más bloques se tenga, el proceso será cada vez más lento, debido a que este estará acumulando todas las dinámicas y perturbaciones de cada bloque anterior. Si se consigue realimentar una variable intermedia, se puede eliminar el efecto de la perturbación de una forma más Rápida, en vez de dejar que simplemente esa perturbación aparezca en la variable principal para rechazarla al final de toda la línea de procesos.

Acá es donde entra el esquema de control en cascada, ya que se puede realizar cuando el proceso a controlar posee diferentes etapas, además de una medición de las variables a controlar y que la variable intermedia que tenga perturbaciones sea más rápida que la variable que se desee controlar, en la figura 1-6 se puede ver un ejemplo de un control en cascada con dos procesos.



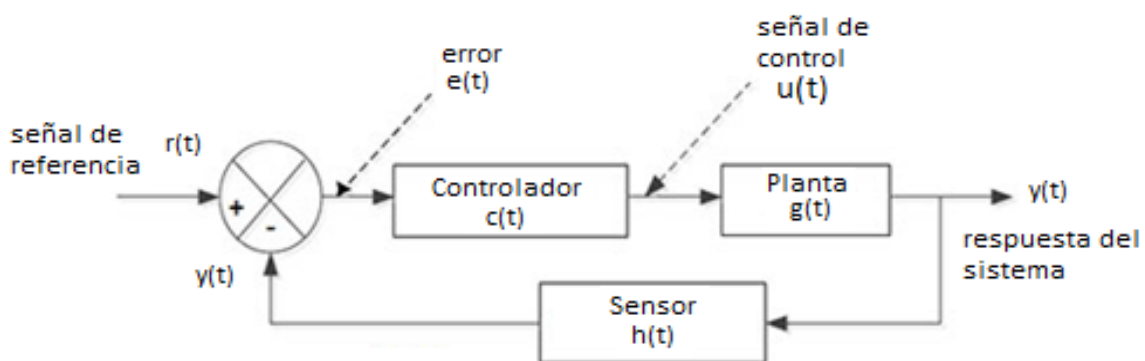
Fuente: <https://controlautomaticoeducacion.com/wp-content/uploads/Proceso-Control-en-Cascada>.

Figura 1-6. Ejemplo de control en cascada.

Observando la malla de control de la figura 1-6, se puede observar en este esquema de control que la perturbación q_1 desaparecerá rápidamente si se incluye un controlador adecuado para la función de transferencia de lazo cerrado interno, generando un bloque de control con valor 1. Con esto, el lazo cerrado externo, que es el proceso principal, no se verá afectado por la perturbación q_1 , porque ya es controlada en el lazo interno.

1.5.2. Estrategias de control - Controlador PID

Un controlador es aquel elemento que reduce la señal de error, en base a la comparación de la señal retroalimentada y la señal de referencia, teniendo esta diferencia entre estos valores procede a actuar con el fin de disminuir este error al mínimo, deseable a 0. A continuación se puede observar en la figura 1-7, un ejemplo de un lazo cerrado de control donde se visualiza el controlador.

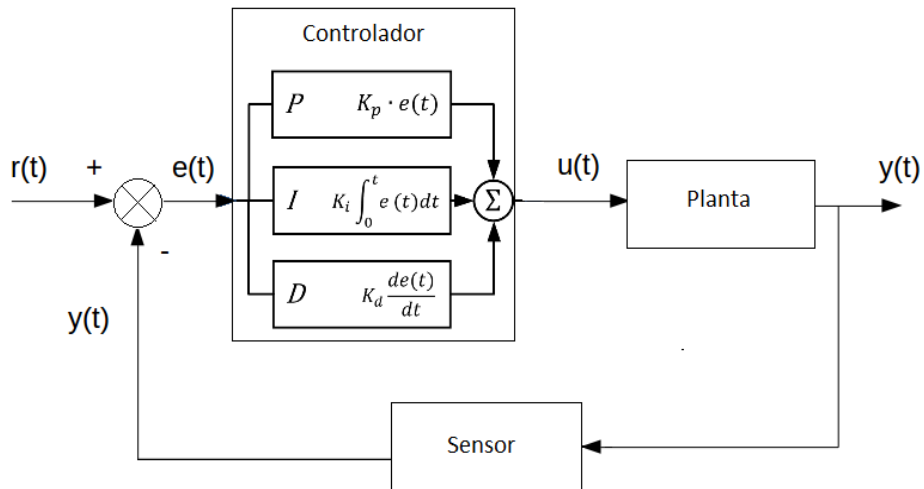


Fuente: Modificado a partir de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50062014000500005

Figura 1-7. Ejemplo de control en lazo cerrado.

Se señalarán las características principales de un controlador PID, el cual será la estrategia de control principal en esta investigación aplicada.

Un controlador PID o control continuo es un mecanismo de control preciso, el cual consiste en la suma de tres parámetros distintos, la acción proporcional (P), la acción integral (I) y la acción derivativa (D), de ahí viene su nombre, en la figura 1-8, visualizada a continuación se puede observar el controlador en un ejemplo de lazo de control.



Fuente: Modificado a partir de <https://programacionsiemens.com/pid-en-step7/>

Figura 1-8. Ejemplo de controlador PID en lazo cerrado.

El control proporcional (P) es la acción de control que responde inmediatamente a los cambios presentes en la entrada generando proporcionalmente cambios en la salida, el fin de la acción proporcional es tener una respuesta enérgica frente a perturbaciones

El control integral (I) es la acción que responde a un error acumulado en el tiempo, forzando la señal de salida tanto como se necesite para eliminar completamente el error en estado estacionario, esto se logra integrando el error.

El control derivativo (D) provee al sistema con un desplazamiento en la señal de salida proporcional a la tasa a la cual cambia la entrada, esta acción sirve cuando el proceso tiene retardo o la señal de respuesta es lenta. Su principal función es reducir las oscilaciones y los peaks causados por perturbaciones en el proceso.

1.6. OBJETIVOS

A continuación, se expone el objetivo general y los objetivos específicos propuestos para este trabajo de título.

1.6.1. Objetivo general

Implementar un control en cascada entre las variables de flujo y nivel en los lazos secundario y primario respectivamente, estación de trabajo FESTO.

1.6.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio acabado de las características de la instrumentación de la planta.

- Obtener funciones de transferencia de los subsistemas, basados en el punto de operación a trabajar.
- Diseñar un controlador para el subsistema de flujo.
- Diseñar un controlador para el subsistema de nivel.
- Graficar señales de los lazos de control en el entorno de HMI.
- Realizar pruebas de funcionamiento.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE INGENIERÍA DE CONCEPTOS

2. DESARROLLO DE INGENIERÍA DE CONCEPTOS

El presente capítulo contemplará el análisis de cada elemento utilizado en el control de las variables de flujo y nivel, el detalle del controlador a utilizar y el esquema de control, el análisis de cada hardware y software utilizado, además de los sistemas de control que se utilizarán propuesto para implementación en la plataforma FESTO.

2.1 ESTUDIO TÉCNICO DE ELEMENTOS A UTILIZAR EN PLANTA

A continuación, se realizará una exposición de cada elemento utilizado en la planta que interviene al control del flujo en el circuito de tuberías y el nivel de líquido en el estanque B102 de la estación de trabajo compacta, detallando sus características tanto físicas como su forma de trabajo, para tener un mejor conocimiento acerca del trabajo aplicado en cada momento del proceso.

Se dividirán en tres ramas, la primera es el sistema eléctrico donde está el controlador lógico programable y la placa de conexión de entradas y salidas, la segunda rama es el control de flujo donde se encuentra la bomba, el sensor de flujo y tuberías y la tercera, la cual es el control de nivel que incluye los estanques y sensores de nivel.

2.1.1. Elementos del sistema eléctrico

En este sistema se encuentran todos los elementos que están interconectados en la placa de conexión que van hacia el PLC, este es un dispositivo electrónico programable capaz de controlar procesos mediante un programa con instrucciones lógicas, definidas por un profesional capacitado, que crea el programa mediante uso de softwares computacionales como es el TIA Portal.

2.1.1.1. PLC Siemens S7-1500

El PLC utilizado para el control de esta planta de procesos es el Simatic S7 -1500, este es un controlador lógico programable de última generación, se diferencia con algunos de los modelos de la marca siemens debido a que es un PLC modular (como el modelo S7-1200), lo que permite utilizar únicamente los módulos que se necesite para su aplicación y en caso de que aumente el número de tareas o procesos a controlar, se puede reequipar el controlador con los módulos que sean necesarios. En otras características tiene una elevada resistencia a perturbaciones electromagnética, choques y vibraciones, esto otorga a el modelo s7-1500 un uso casi universal en los diferentes ámbitos de la industria.

Este PLC cuenta con la CPU, una fuente de poder y cuatro módulos de entradas y salidas, digitales y analógicas que a continuación se describirán:

- CPU 1516-3 PN/DP

La unidad de control de procesos de este PLC se muestra en la figura 2-1, esta CPU es la encargada de realizar la ejecución del programa de control que es almacenado en la memoria que tiene incorporada internamente o mediante una memoria SD de hasta 2 GB fabricada por Siemens. El modelo 1516-3 PN/DP cuenta un display que puede mostrar la puesta en marcha, configuración y diagnóstico de la CPU, una memoria de trabajo de 6,5 MByte y un tiempo de ejecución de las operaciones con bits de 10 ns. Por otro lado, el módulo puede comunicarse mediante las distintas redes o dispositivos como pantallas HMI, variadores de frecuencia, otros PLCs y computadores por medio de Profibus o Profinet, estos son dos protocolos diferentes de comunicación ampliamente implementados y desarrollados para uso en automatización industrial.



Fuente: <https://www.automation.siemens.com>

Figura 2-1. CPU de PLC.

- Fuente de poder PM 190 W 120/230 V AC:

La fuente de poder del modelo S7-1500, que se puede observar en la figura 2-2, posee una entrada de voltaje alterno de 110/220 V, puede entregar hasta 190W energizando la unidad de control de procesos y los distintos módulos que se requieran, en el caso del PLC implementado para el control de las variables en la planta son cuatro módulos de entradas y salidas.



Fuente: <https://www.automation.siemens.com>

Figura 2-2. Fuente de poder de PLC.

- Módulos de entrada y salidas análogas y digitales.

Los módulos como el mostrado en la figura 2-3 que se utilizan para el procesamiento de las señales de entradas y salidas en la estación de trabajo cuatro, dos análogas y dos digitales. Los módulos digitales son los siguientes:

- Entradas digitales: DI 32x24 VDC HF
- Salidas digitales: DQ 32x24 VDC/0.5A HF

Cada uno de estos módulos cuenta con 32 puntos de conexión de dispositivos digitales, con una tensión de 24 VDC en cada punto, las salidas digitales están aisladas en grupos de 8, con una intensidad de 0,5 A por cada canal.

Los módulos utilizados para la recepción y envío de señales análogas son:

- Entradas análogas: 8XU/I/RTD/TC ST
- Salidas análogas: 4XU/I ST

Las entradas análogas en el módulo son 8, con tipo de medición de tensión, intensidad, termo-resistencia y termopar ajustable y las salidas análogas son un total de cuatro dentro del módulo con selección de salida de tensión e intensidad.



Fuente: <https://www.automation.siemens.com>

Figura 2-3. Módulos utilizados en PLC.

2.1.1.2. Pantalla HMI Siemens

La pantalla de la figura 2-4, es utilizada para introducir el set point de nivel, donde se podrá visualizar el proceso en los estanques y observar la gráfica que se generan por los sensores de nivel y flujo. Esta es una pantalla Siemens modelo KTP600 Basic color PN incorporada en la estación experimental de trabajo, este dispositivo cuenta con una operación táctil, una pantalla de 6 pulgadas con 256 colores, 6 botones de funciones físicos y una interfaz Profinet para la configuración y comunicación de este elemento y es configurable mediante el software TIA Portal



Fuente: <https://www.plc-city.com/>

Figura 2-4. HMI KTP600.

2.1.1.3. Placa de conexión E/S

La placa de conexión E/S de la figura 2-5 es la interfaz para todas las señales análogas y digitales, acá se concentran todos los controladores de los actuadores, y los transmisores que convierten la señal de los sensores a una señal normalizada.

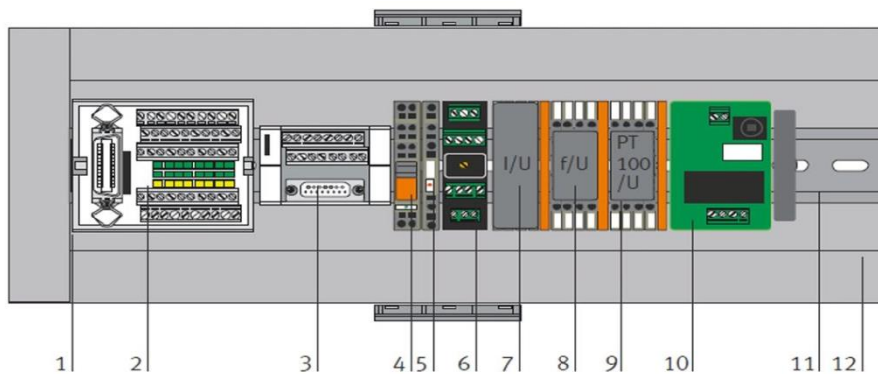


Fuente: Captura tomada laboratorio M203.

Figura 2-5. Placa de conexión E/S.

El orden de cada elemento de esta placa se puede visualizar en la figura 2-6 donde se encuentran numeradas de izquierda a derecha, estos elementos son los siguientes:

- 1) Placa de montaje que soporta el riel DIN.
- 2) Regleta de entradas y salidas como sensores capacitivos y válvula de bola de dos vías.
- 3) Regleta de terminales analógicos como bomba de agua y válvula proporcional.
- 4) Relé K1: cuando está activado pasa a modo analógico la bomba.
- 5) Relé A4: controla la activación de la válvula proporcional.
- 6) Controlador del motor A1: controlador binario y controlador análogo de la bomba de agua.
- 7) Transmisor A2 de sensor ultrasónico: convierte la señal de corriente 4-20mA a tensión 0-10V.
- 8) Transmisor A4 de sensor de opto electrónico: convierte la señal de frecuencia de 0-1200Hz a tensión 0-10V.
- 9) Transmisor A3 de Termocupla PT100: convierte la señal de la termocupla (resistencia variable) a una tensión de 0-10V
- 10) Limitador de corriente de arranque para bomba



Fuente: elaboración propia.

Figura 2-6. Disposición de elementos en placa de conexión.

2.1.2. Elementos del subsistema de flujo

Los elementos que se utilizarán dentro de la estación de trabajo para el control de la variable física de flujo son los que se pueden ver en la figura 2-7, la actuación va por parte de la bomba de agua indicada con el número 1, que impulsará el líquido por el circuito de tuberías y el sensor de flujo opto electrónico con el número 2, este será el encargado de medir la velocidad de la turbina interna incorporada dentro del sensor y la válvula de bola de dos vías para poder abrir el camino entre los circuitos de tuberías para conectar los dos estanques .



Fuente: Manual PCS Compact Workstation.

Figura 2-7. Bomba de agua y sensor de flujo.

2.1.2.1. Bomba centrífuga de agua

La bomba centrífuga que se observa en la figura 2-7, tiene una tensión de trabajo entre 0 a 24 VDC, con una potencia máxima de 26W, impulsa el líquido con una velocidad máxima de 4.3 l/min. Esto fue obtenido realizando una prueba práctica, observando los litros dentro del estanque B102 después de pasado un minuto a su funcionamiento máximo. Esta bomba tiene dos modos de funcionamiento que se controlan mediante el relé K1 (dentro de la placa de conexión de E/S), el modo binario que solo regula el encendido o apagado y el modo analógico, donde trabaja regulando la velocidad con un controlador de 0 a 10 V.

2.1.2.2. Sensor opto electrónico

El sensor opto electrónico visto en la figura 2-7 es un sensor IR-OPFLOW tipo 2, posee una turbina en su interior que gira al paso del agua, el sensor mide ópticamente la velocidad a la cual giran las paletas de la turbina, tiene un umbral de trabajo de entre los 0,3 a los 9,0 l/min, su voltaje de entrada es de los 8 a 24 VDC y envía al PLC una señal de frecuencia de 0 a 1200 Hz que dependerá de la velocidad del agua.

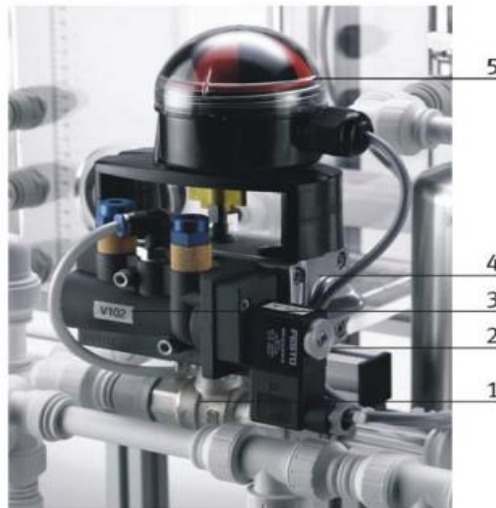
2.1.2.3. Válvula de Bola de dos vías con accionamiento rotativo neumático

La válvula que se observa en la figura 2-8, consta de 5 partes iniciales enumeradas en la figura ya mencionada:

- 1) Válvula de bola.
- 2) Solenoide.

- 3) Válvula de dos vías con sensor NAMUR.
- 4) Accionamiento rotativo tipo SYPAR.
- 5) caja de sensor.

Con este elemento se controla el paso del líquido del estanque superior al estanque inferior. El actuador es abierto o cerrado neumáticamente gracias al compresor de aire implementado en la planta de trabajo y al accionamiento del solenoide de 24 VDC al interactuar con la válvula de dos vías y por la entrega del suministro de aire comprimido por el compresor de aire Hyundai, trabaja con una presión de entre los 2 y 10 bar, la caja de sensor posee dos Switches (S115 y S116) que indican la posición de apertura conectados en la regleta XMA1 además de un indicador visual.



Fuente: Manual PCS Compact Workstation.

Figura 2-8. Válvula de dos vías.

2.1.2.4. Compresor Hyundai

La unidad de servicio neumático se utiliza para suministrar el aire comprimido que utiliza la válvula de bola de dos vía, mostrada en la figura 2-9, posee una potencia de 2 Hp, una capacidad de 24 litros en su estanque, con una velocidad de flujo de entre 195 a 135 l/min, además tiene un regulador de presión montado sobre el tanque, una válvula de seguridad de sobre presión y una protección plástica sobre los elementos que alcanzan temperatura mientras trabaja.



Fuente: Página web de Sodimac.

Figura 2-9. Compresor de aire Hyundai.

2.1.3. Elementos del subsistema de nivel

Los elementos que se utilizan principalmente para el control de nivel son los estanques (1) y el sensor ultrasónico (2) visibles en la figura 2-10, estos serán comentados a continuación.



Fuente: Manual PCS Compact Workstation.

Figura 2-10. Estanque de agua y sensor ultrasónico de nivel.

2.1.3.1. Sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico indicado con el número dos de la figura 2-10 es de la marca Siemens, su modelo es el 3RG6232-3LS00-PF, la función que cumple es medir el nivel del estanque B102 a través de una onda ultrasónica, está dispuesto en la parte superior del estanque, en su tapa exactamente; la tensión con la que se energiza este sensor es de 24 VDC, su rango de trabajo es de los 50 a 300 mm y envía hacia el controlador una señal de salida de 4 a 20 mA.

2.1.3.2. Estanques

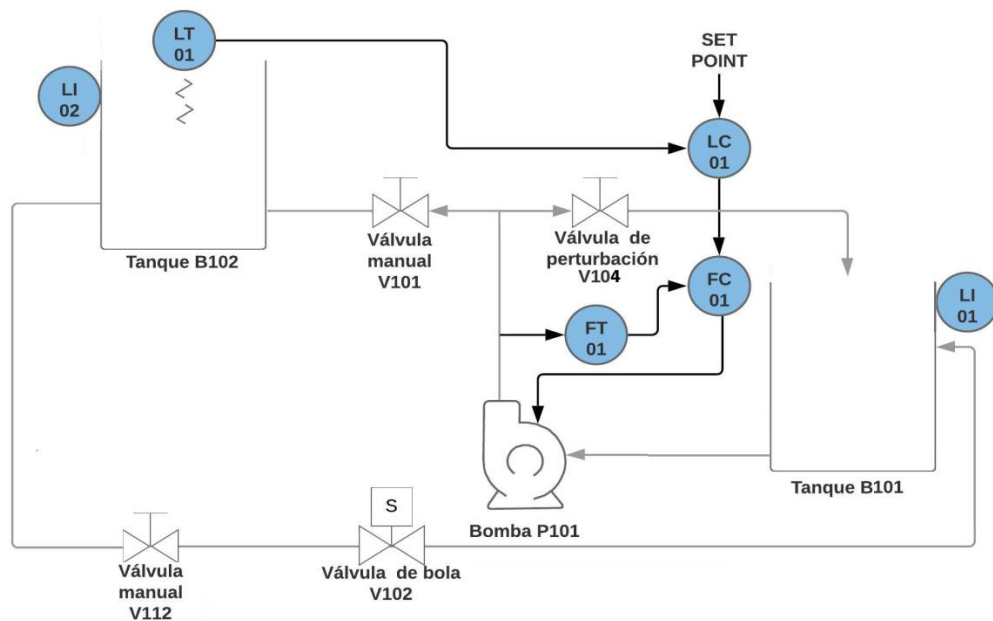
El estanque inferior B101 es el contenedor de agua y el superior B102 es el acumulador, ambos tienen características similares, posee una dimensión de 380 mm de altura, 240 mm de ancho y 190 mm de profundidad, ambos cuentan con un indicador de nivel de entre los 0 a 300 mm, el estanque superior en la parte posterior contiene un indicador de litros que va de los 0 a los 10 litros de agua.

2.2. ANÁLISIS DE ESQUEMA DE CONTROL EN CASCADA

Para visualizar de mejor forma el diagrama de bloques del esquema de control en cascada y tener una idea de qué realizará cada elemento, se presenta el diagrama P&ID de los instrumentos anteriormente mencionados.

2.2.1. Diagrama P&ID de control de flujo y nivel

En la figura 2-11 se observa el diagrama P&ID que se utilizará en la planta, entrega una representación del circuito por donde pasará el líquido a través de la planta de procesos y cómo trabajan los instrumentos para realizar el control de nivel y flujo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-11. Diagrama P&ID de control de variables.

Explicando de manera sencilla, se deberá introducir un set point de nivel para el estanque acumulador de agua (B102), el sensor ultrasónico LT01 enviará al controlador de nivel LC01 los datos para regular la variable encendiendo la bomba P101 cuando se requiera, al mismo tiempo gracias al set point de flujo entregado por el controlador de nivel se regulará el

flujo entregado por la bomba de agua obteniendo las mediciones mediante el sensor opto electrónico FT01.

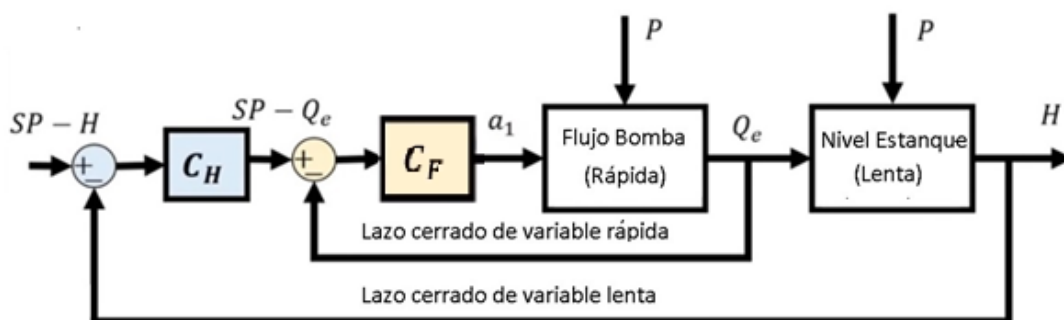
Sabiendo esto se procede a realizar el diagrama de bloques con el esquema de control en cascada de las variables de flujo y nivel.

2.2.2. Diagrama de bloques para el control de flujo y nivel

El diagrama de bloques se utiliza para representar el flujo de señales entre cada bloque con el fin de indicar de manera más realista qué pasa entre cada elemento que lo componen.

Como se comentó en el capítulo anterior, el esquema de control en cascada, se realiza una prueba de llenado del estanque B102, enviando un escalón de voltaje al controlador del motor, con el objetivo de saber cuál es la variable rápida y lenta, así ordenarlos dentro del diagrama de bloques.

Al realizar la prueba, se verifica que la variable rápida es el flujo, ya que al enviar el escalón de entrada llega a su valor estacionario aproximadamente a los 2 segundos, por otro lado, al nivel le toma aproximadamente 6 minutos en llegar a su estado estacionario.



Fuente: Modificado a partir de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/>.

Figura 2-12. Diagrama de bloques de control de nivel y flujo.

De la figura 2-12 se desprende que:

- SP: Set point de nivel.
- Q_e : Flujo dentro del sistema de tuberías.
- H: Nivel en el estanque.
- SP-H: Referencia del subsistema de nivel dentro del esquema de control.
- SP- Q_e : Referencia de subsistema de flujo dentro.
- α_1 : Señal de control proveniente del controlador de flujo.

Al utilizar el esquema en cascada se podrán eliminar las perturbaciones rápidas provenientes del subsistema de flujo para poder obtener un mejor control del nivel en el

estanque B102 utilizando solo un actuador, enviando una relación de flujo/ voltaje desde el bloque de la función de transferencia del flujo al bloque de la función de transferencia de nivel del estanque.

2.3. LINEALIDAD DE LOS SISTEMAS

Un sistema lineal e invariante en el tiempo es el sistema que no cambia con el paso de tiempo y sigue conservando su misma magnitud. Debe satisfacer los principios de superposición y homogeneidad, las cuales engloba la proporcionalidad, el escalado y la aditividad, esto quiere decir que los cambios que se efectúen en la entrada o referencia de sistema deben ser similares a los cambios en la salida o respuesta de este.

Se debe saber si el sistema es lineal o no para poder obtener punto de operación y una función de transferencia con la que trabajar, con el propósito de que los controladores que se obtengan trabajen de manera eficaz sobre cada sistema.

Para esto se debe realizar una prueba que determinara si los sistemas son lineales o no, que consiste en enviar un escalón de voltaje determinado al controlador de la bomba y esperar a que se estabilicen las variables, al llegar al valor en su estado estacionario se anotara y se aumentara el escalón, se repite la prueba hasta llegar al valor máximo de voltaje de trabajo del actuador, con esto se generara una tabla y gráficos para poder aplicar los principios de superposición y homogeneidad de un sistema lineal.

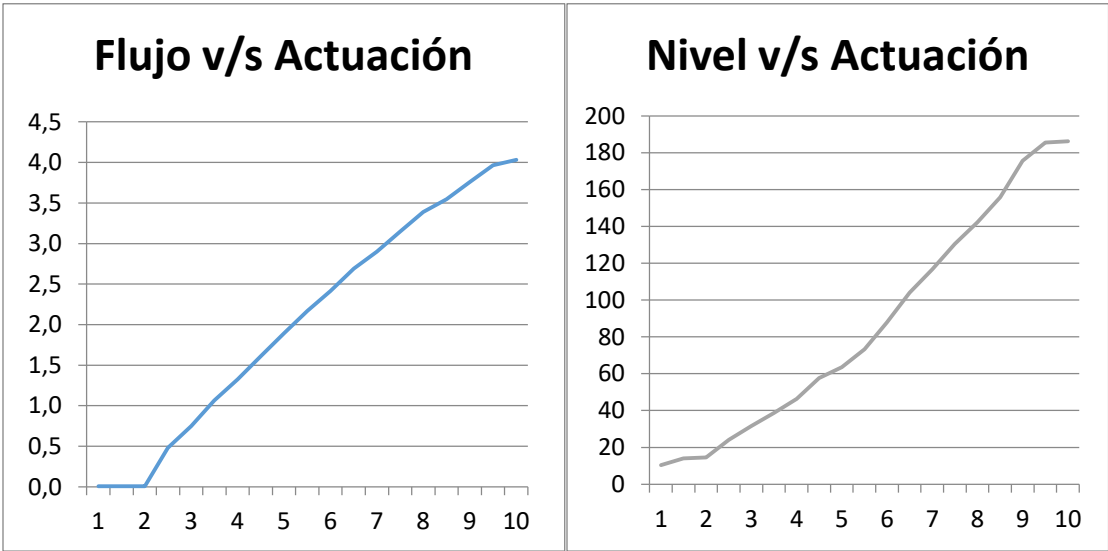
La tabla 2-1 representa los valores generadas por la prueba mencionada.

Tabla 2-1. Datos de pruebas de escalones de actuación.

Actuación (V)	Nivel de agua (mm)	Flujo de agua (l/min)
1,0	10,373	0,0080
1,5	14,095	0,0080
2,0	14,605	0,0090
2,5	24,023	0,4796
3,0	31,521	0,7494
3,5	38,737	1,0641
4,0	46,408	1,3270
4,5	57,552	1,6124
5,0	63,618	1,8948
5,5	73,25	2,1698
6,0	87,923	2,4146
6,5	99,350	2,864
7,0	115,667	2,8993
7,5	130,501	3,1467
8,0	142,329	3,3898
8,5	155,794	3,5467
9,0	175,618	3,7590
9,5	185,525	3,9634
10,0	186,187	4,03

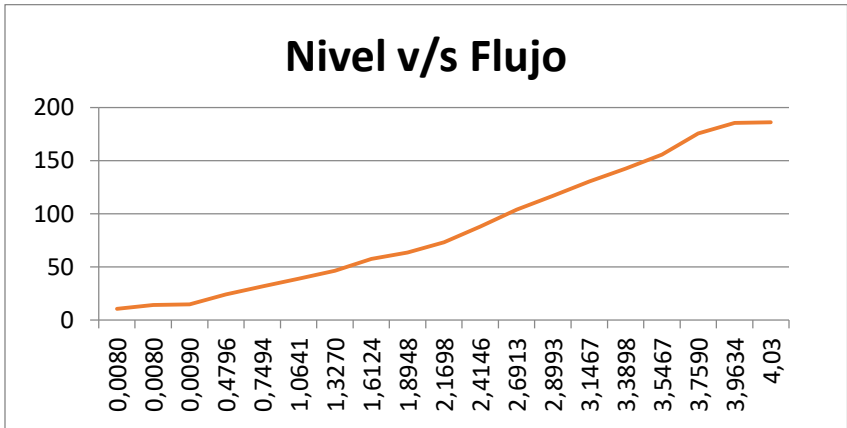
Fuente: Elaboración propia.

Al obtener los datos se realizarán tres gráficos para representar de manera más práctica el comportamiento de las respuestas, el primer gráfico es de flujo v/s actuación, el segundo de nivel v/s actuación y el tercero de nivel v/s flujo, ya que la función de transferencia de nivel utilizará una la relación entre flujo y voltaje para poder efectuar el control con solo un actuador.



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la planta de procesos.

Figura 2-13. Gráficos de flujo y nivel v/s actuación.



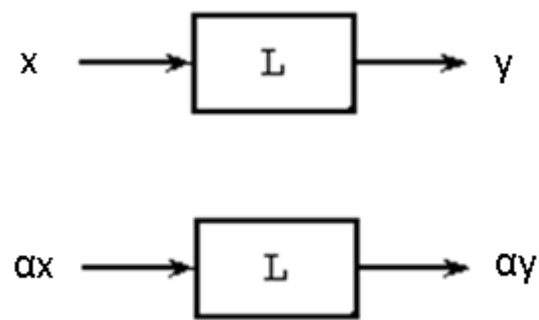
Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la planta de procesos.

Figura 2-14. Gráfico de nivel v/s flujo.

Al examinar la figura 2-13 y la figura 2-14, se percata a simple vista que los sistemas no son lineales, pero se verificará matemáticamente esta variación en el tiempo, aplicando los principios de superposición y homogeneidad de los sistemas LTI a las señales obtenidas de las mediciones de flujo y nivel.

2.3.1. Homogeneidad de las señales

La homogeneidad consiste en una variación proporcional al cambio en la entrada, esto quiere decir en que, si a un sistema se le aplica una referencia x , esta entrega una respuesta y , si es lineal la función, la referencia puede multiplicarse por una constante α , la respuesta de este sistema debe entregar una salida proporcional al cambio en la referencia, en este caso α , como se muestra en la figura 2-15.



Fuente: Obtenido y modificado a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_superposici3n.

Figura 2-15. Ejemplo homogeneidad.

Entendiendo este concepto de homogeneidad se obtienen los valores de respuestas del nivel y flujo con una actuaci3n de 4V y de 8V de la tabla 2-1, el valor de α es 2 en la referencia, y los valores de α en las respuestas de nivel y flujo son las siguientes:

Tabla 2-2. Datos de pruebas de homogeneidad.

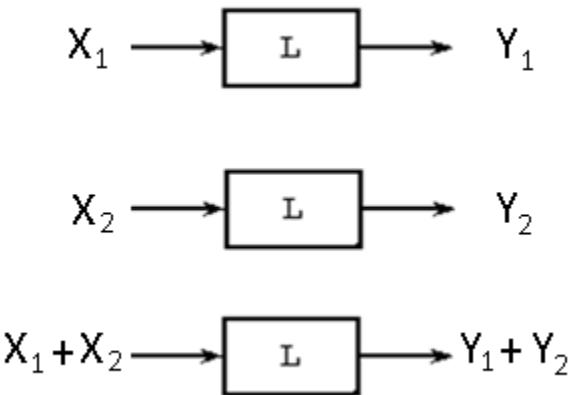
	Actuaci3n (V)	Nivel (mm)	Flujo (l/min)
	4	46,408	1,327
	8	142,329	3,3898
α	2	3,66	2,55

Fuente: Elaboraci3n propia generada gracias a los valores de tabla 2-1.

Se puede observar en la tabla 2-2, el valor de α de nivel es de 3,66 y el de flujo es 2,55, se deduce que los sistemas de nivel y flujo no son homog3neos debido a que deber3an tener un valor de α igual a 2.

2.3.2. Superposición de las señales

La superposición de un sistema LTI consiste en que, si a un sistema se excita con la suma de dos funciones, la respuesta es la suma de las respuestas individuales, quiere decir que si introduzco una entrada x_1 y produce una respuesta y_1 y si a una referencia distinta como x_2 produce una respuesta y_2 , la sumatoria de las entradas x_1+x_2 debe producir una salida de y_1+y_2 , como lo muestra en la figura 2-16.



Fuente Obtenido y modificado a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_superposici3n.

Figura 2-16. Ejemplo superposición.

Aplicando la superposición a los sistemas de nivel y flujo con actuaciones de 4V y 5V debería dar como resultado las respuestas al valor de la referencia de 9V, para que fuese lineal cada sistema. Los valores de las respuestas a los escalones de voltaje en la bomba son los siguientes:

Tabla 2-3. Datos de pruebas de superposición.

Actuación (V)	Nivel (mm)	Flujo (l/min)
4	46,408	1,327
5	63,618	1,8948
9 (sumatoria)	110,26	3,2219
9(real)	175,618	3,759

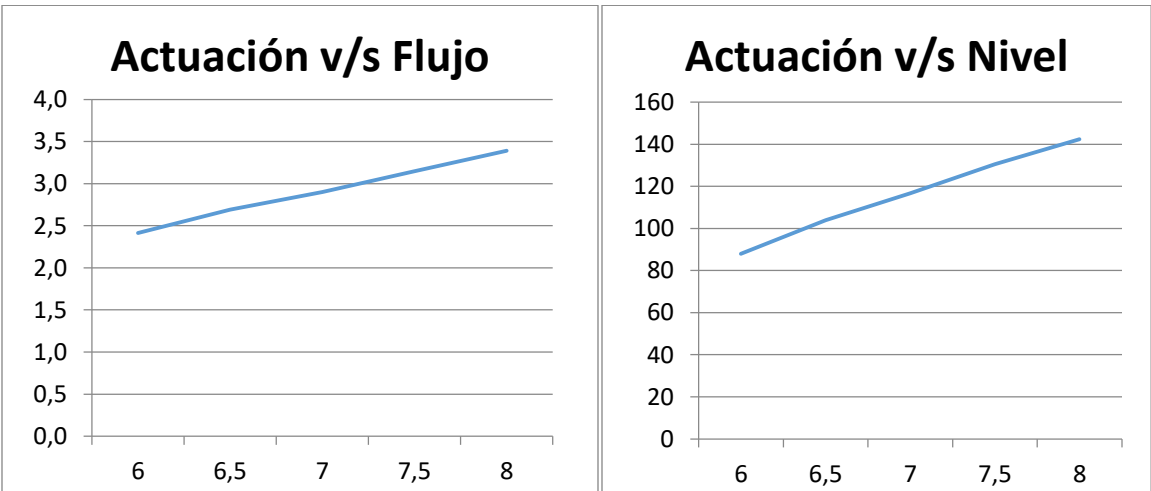
Fuente: Elaboración propia generada gracias a los valores de tabla 2-1.

Al mirar la tabla 2-3, se verifica que los sistemas de nivel y flujo no cumplen con la propiedad de la superposición, ya que la sumatoria de las salidas de los sistemas no es igual al valor real que se obtiene midiendo las respuestas.

2.3.3. Punto de operación a trabajar

Un sistema no lineal puede tener muchísimas funciones de transferencias y controladores en su rango total de trabajo, para evitar ese cambio y trabajar con una sola función de transferencia se acota el rango de trabajo a un punto de operación reducido con el fin de que los subsistemas de flujo y nivel trabajen de la forma más lineal posible, produciendo que los controladores trabajen eficazmente y que no deba ser alterado a mitad de proceso de control de las variables.

Se aprecia en las figuras 2-13 y figura 2-14 que es un rango reducido en el cual trabaja de forma más lineal ambos sistemas, el cual se genera entre los 6,5[V] y 7,5 [V] de actuación, lo que quedaría para el sistema de flujo es entre (6.5 [V], 2.8 [l/min]) y (7.5 [V], 3.3[l/min]) y el sistema de nivel su punto de operación está entre (2.8 [l/min], 99[mm]) y (3.3[l/min], 129[mm]). Se verifica en la figura 2-17 que trabaja como un sistema LTI, con lo que se utilizará ese punto de operación para poder obtener las funciones de transferencia y los controladores para cada sistema.



Fuente: Elaboración propia, obtenidos de figuras 2-13 y figura 2-14.

Figura 2-17. Punto de operación a trabajar.

2.4. OBTENCIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia es un modelado matemático de los sistemas que relaciona entrada y salida de estos. Se modela utilizando la transformada de Laplace de la respuesta o salida, a la transformada de Laplace de la entrada o referencia.

La función de transferencia $G(s)$ está definida como:

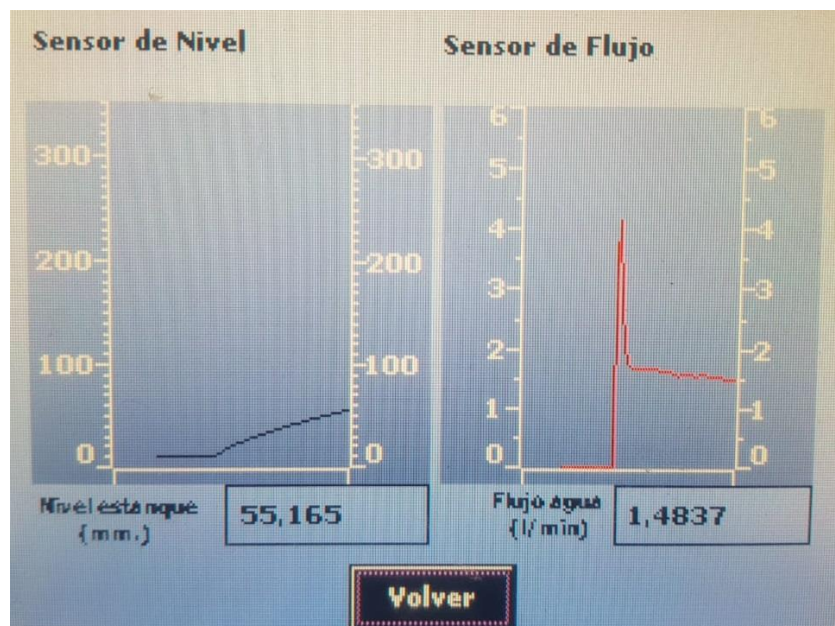
$$G(s) = \frac{\mathcal{L}(Salida)}{\mathcal{L}(Entrada)} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

Donde los polinomios $B(s)$ y $A(s)$ corresponden al numerador y al denominador de la función de transferencia, si no tienen factores comunes se dice que:

- Las raíces de $B(s)$ son ceros de $G(s)$
- Las raíces de $A(s)$ son polos de $G(s)$

El comportamiento de la respuesta transitoria de $G(s)$ dependerá significativamente de la ubicación de los polos de la función, a estos se les llaman polos dominantes y están ubicados cercanos al eje imaginario del plano S .

Otro punto importante es la clasificación del sistema, como el orden de la ecuación diferencial, que dependerá del grado mayor de la derivada, en este caso, se pudo observar gracias a las pruebas realizadas que el sistema de nivel es de 1° orden y el sistema de flujo es de 2° orden por el peak de sobre impulso y luego a como lo muestra la figura 2-18.



Fuente: Captura tomada laboratorio M203

Figura 2-18 Prueba de sensores.

Para poder obtener la función de transferencia se realizará una prueba tomando muestras cada 100 ms con el fin de obtener los datos de medición dentro del punto de operación que se obtuvo anteriormente. Se envía un escalón de entrada de valor 6,5 V, al momento de que lleguen las variables al valor del régimen permanente aumentar el escalón a 7,5 V llegando cada una a su estado estacionario se finaliza la prueba. Con los datos obtenidos del segundo escalón mediante LabVIEW comunicando el PLC con el computador por un servidor OPC, se realizará la obtención de las funciones de transferencias con la aplicación de Ident dentro del software Matlab para obtener $G(s)$ de cada sistema.

Para esto lo primero que se debe realizar es el programa de control mediante TIA Portal para generar las mediciones.

2.4.1. Programa de control en TIA Portal

Lo primero que se debe realizar en el programa de control dentro de la CPU es configurar el hardware a utilizar, en esta ocasión el PLC Siemens S7-1500 y la pantalla HMI KTP600, agregando cada módulo y entregando una dirección IP de la misma red a cada hardware para poder generar la comunicación entre la pantalla, la CPU y el Software. Las direcciones IP utilizadas para cada componente son los siguientes:

- CPU PLC Siemens S7-1500: 192.168.0.1
- Pantalla HMI KTP600: 192.168.0.2
- Adaptador de red Realtek PCIe de computador: 192.168.0.5

Después de esto se genera una tabla de variables con todos los elementos que se utilizarán, como los sensores de flujo y nivel, los actuadores como la bomba y la válvula de bola de dos vías, memorias internas de set point y de guardado de valores de nivel y flujo normalizados y reales tal como lo muestra la figura 2-19, donde se observan todas las variables utilizadas para el control simple ON/OFF con el fin de obtener los datos necesarios.

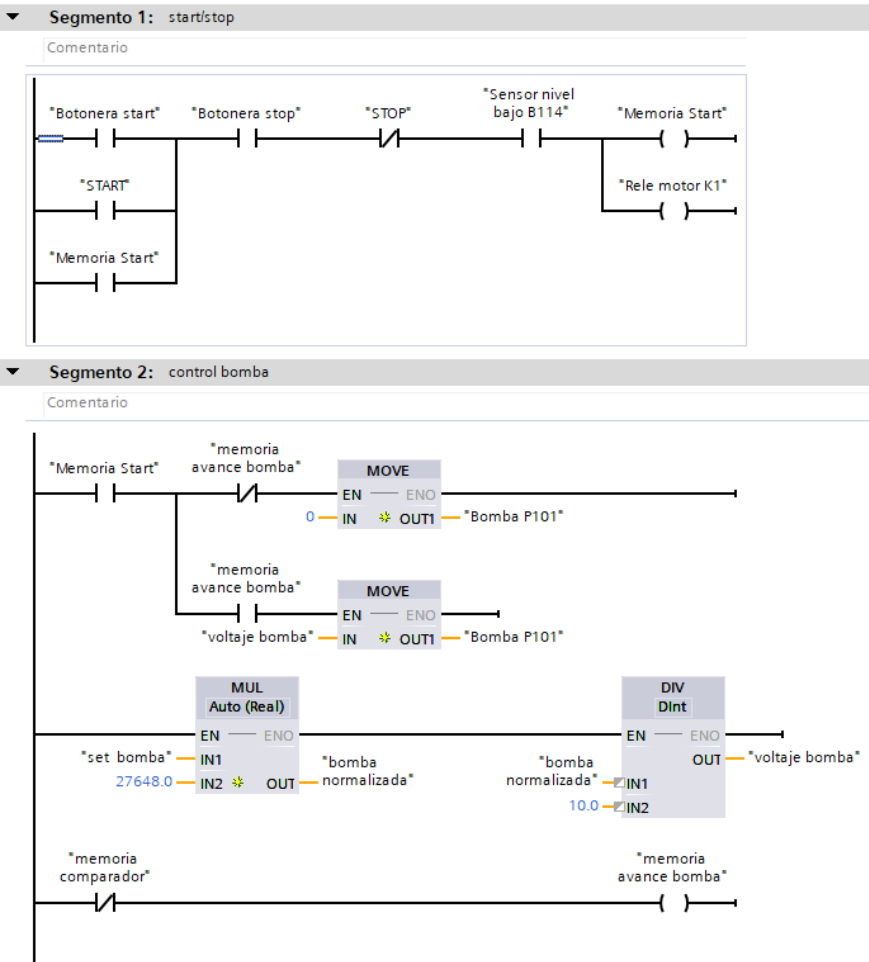
Variables PLC				
	Nombre	Tabla de variables e..	Tipo de datos	Dirección
1	 Botonera start	Tabla de variables e..	Bool	%I17.0
2	 Botonera stop	Tabla de variables e..	Bool	%I17.1
3	 Bomba P101	Tabla de variables e..	Word	%QW0
4	 Sensor nivel B102	Tabla de variables e..	Word	%IW0
5	 Sensor flujo tuberías	Tabla de variables e..	Word	%IW2
6	 Rele motor K1	Tabla de variables e..	Bool	%Q8.2
7	 Set Point	Tabla de variables e..	Real	%MD1
8	 Memoria Start	Tabla de variables e..	Bool	%M0.0
9	 Sensor nivel bajo B114	Tabla de variables e..	Bool	%I16.4
10	 Sensor nivel Alto B113	Tabla de variables e..	Bool	%I16.3
11	 Nivel B102 norm	Tabla de variables e..	Real	%MD10
12	 Nivel B102 Real	Tabla de variables e..	Real	%MD20
13	 Flujo norm	Tabla de variables e..	Real	%MD30
14	 Flujo real	Tabla de variables e..	Real	%MD40
15	 Nivel B101 Real	Tabla de variables e..	Real	%MD50
16	 START	Tabla de variables e..	Bool	%M0.1
17	 STOP	Tabla de variables e..	Bool	%M0.2
18	 voltaje bomba	Tabla de variables e..	DWord	%MD60
19	 set bomba	Tabla de variables e..	Real	%MD70
20	 bomba normalizada	Tabla de variables e..	Real	%MD80
21	 Valvula Proporcional	Tabla de variables e..	Word	%QW2
22	 bomba binaria	Tabla de variables e..	Bool	%Q8.3
23	 memoria comparador	Tabla de variables e..	Bool	%M0.4
24	 memoria avance bomba	Tabla de variables e..	Bool	%M0.5
25	 Apertura valvula de bola	Tabla de variables e..	Bool	%Q8.0
26	 apertura valvula bola	Tabla de variables e..	Bool	%M0.6
27	 litros estanque b102	Tabla de variables e..	Real	%MD90
28	 litros estanque b101	Tabla de variables e..	Real	%MD100

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-19. Tabla de variables.

Generando la tabla de variables se procede a la realización del diagrama de control, en este caso se utiliza el lenguaje gráfico ladder o diagrama escalera para realizar la programación.

En la figura 2-20 se presentan dos segmentos del programa de control, estos dos segmentos constan de todo el proceso de inicio y apagado de la bomba, la retención del set point ingresado vía HMI del escalón de voltaje para la bomba dentro de una memoria Dword y la inserción del escalón dentro de la salida análoga de la bomba.

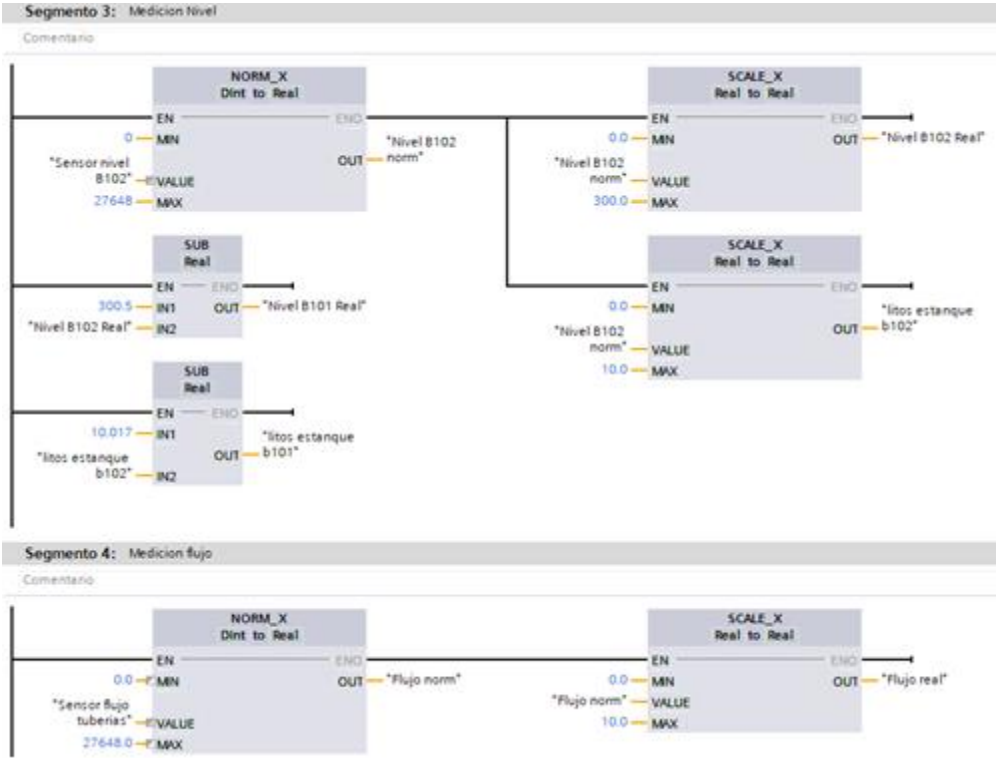


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-20. Segmentos de start y control de la bomba.

Los siguientes dos segmentos que se presentan en la figura 2-21 son las mediciones de flujo y nivel, cada medición tomada de los sensores se normaliza con un bloque NORM_X a un rango de normalización analógica que va entre los 0 a 27648 y después un bloque de escalado llamado SCALE_X que escala el valor normalizado al valor deseado para poder visualizar en la pantalla HMI y en LabVIEW, en el caso del nivel se escala a valores de 0 a 300 mm, que es el nivel que tiene el estanque B102 y el flujo se escala de 0 a 10 l/min, ya que es el valor de trabajo de la bomba según los datos técnicos de la misma.

Por último, se realiza un segmento de comparación entre un set point de nivel y el valor de nivel real del estanque B102 para el control ON/OFF de la bomba y un segmento de apertura de la válvula de bola de dos vías.



Fuente: Captura de pantalla desde programa TIA Portal.

Figura 2-21. Segmento de medición de flujo y nivel.

Con el programa de control listo y funcionando correctamente y las IP’s establecidas se procede a la realización de la conexión entre la conexión entre el PLC y OPC server.

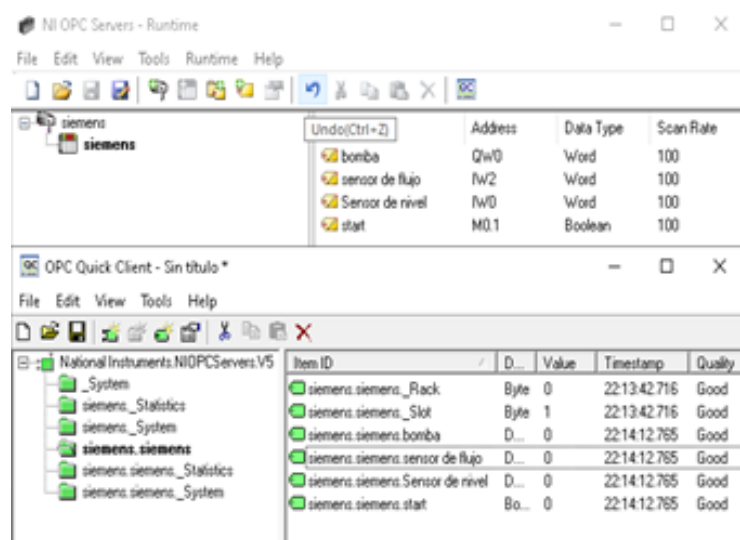
2.4.2. Conexión de PLC mediante un servidor vía NI OPC Server

Para generar la conexión y obtener los datos por un servidor OPC se debe trabajar dentro de un canal generado dentro de este software, para configurarlo se debe crear un canal, al realizarlo se podrá configurar el nombre de este (en este caso se llamará Siemens, aludiendo a la marca del PLC), se configura el controlador del dispositivo, que es siemens TCP/IP Ethernet (método de conexión dentro del PLC), el adaptador de red del computador el cual es Realteck PCIe, el método de optimización y el tipo de valor que toman los valores no normalizados quedan con su valor por default.

El canal queda configurado y listo para agregar un dispositivo donde se configura el nombre, el modelo de PLC, la dirección de la red del PLC, y el tipo de orden de los Bytes entregados por el PLC que en los modelos S7 de siemens utiliza el orden Big Endian. Después de configurar el dispositivo se procede a agregar las variables que se deseen exportar a LabVIEW.

Para exportarlas dentro del dispositivo se debe agregar las variables por cada una, configurando un nombre, una descripción y la dirección de cada variable dentro del programa de control. Para verificar si la conexión de la variable se generó correctamente, se utiliza la función Quick Client dentro de OPC Server como se muestra en la figura 2-22, se verifica el valor

y la calidad de las variables, si la calidad es buena y el valor de la variable concuerda con el mostrado dentro de la pantalla HMI la conexión fue creada con éxito.

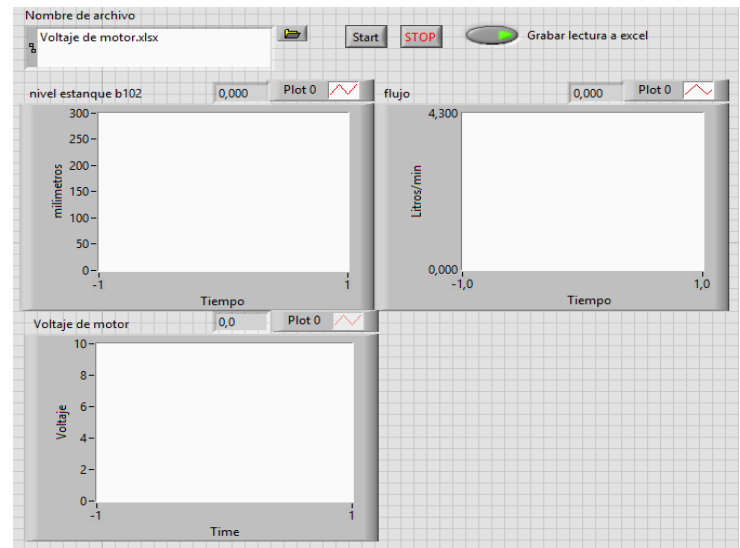


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-22. Conexión PLC y servidor OPC.

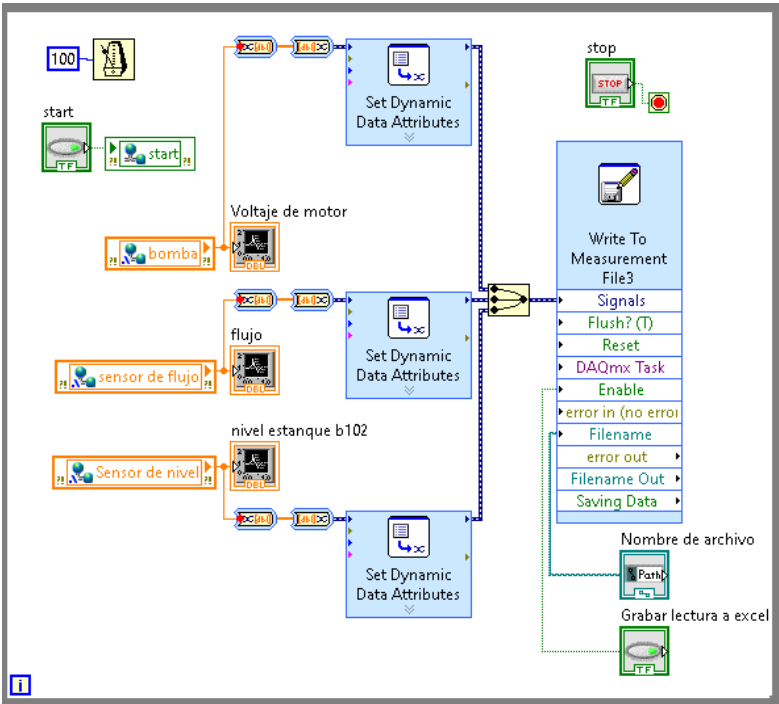
2.4.3. Obtención de mediciones con LabVIEW

Con la conexión de servidor realizada se procede a generar el programa para la obtención de los datos necesarios, en LabVIEW se agrega el servidor OPC y las variables a la librería y se genera un panel frontal como en la figura 2-23, se observa el comportamiento de las variables y la actuación mediante un visor de señales y se genera el archivo Excel gracias a la conexión de los bloques de las señales a un bloque llamado Write to measurement, este se encarga de generar el archivo y lo modifica cada 100 ms, dado el valor de muestreo indicado en el diagrama de bloques dentro de LabVIEW mostrado en la figura 2-24.



Fuente: Elaboración propia.

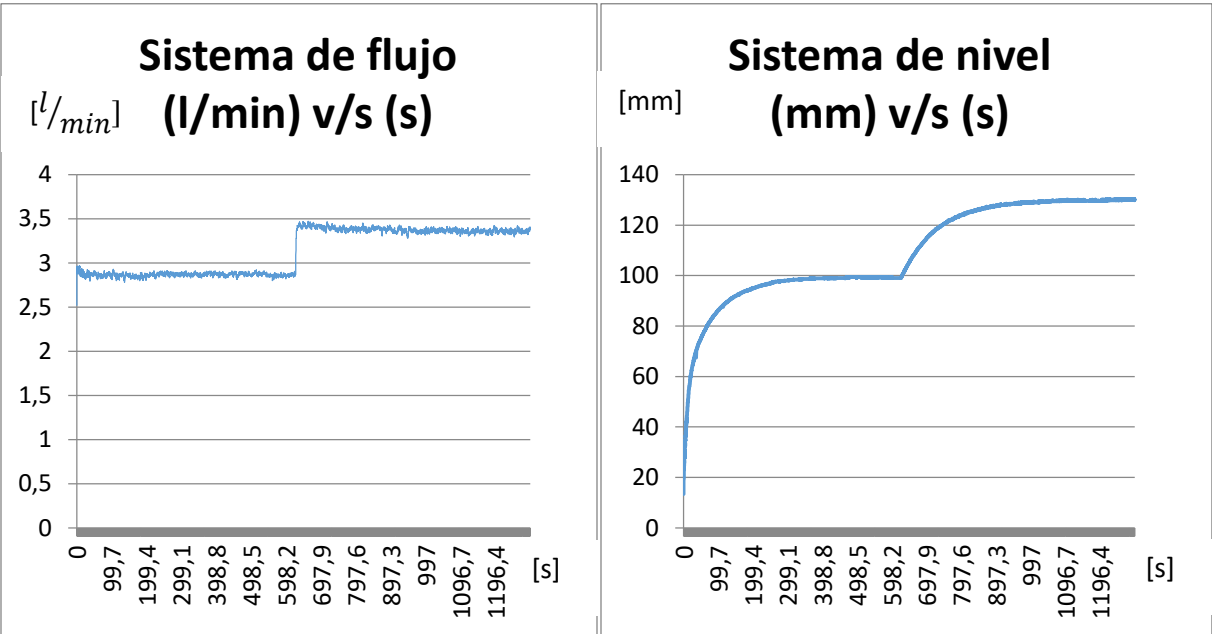
Figura 2-23. Panel frontal de LabVIEW.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-24. Diagrama de bloques en LabVIEW.

Una vez realizada la conexión y completado el diagrama de control en LABVIEW se procede a inyectar un escalón de 6,5 V y luego uno de 7,5 V, despues de una prueba con una duración de 20 min se genera el archivo excel, donde se obtienen las gráficas presentadas en la figura 2-25, y da comienzo con el proceso de obtencion de las funciones de transferencias en Matlab.



Fuente: Elaboración propia.

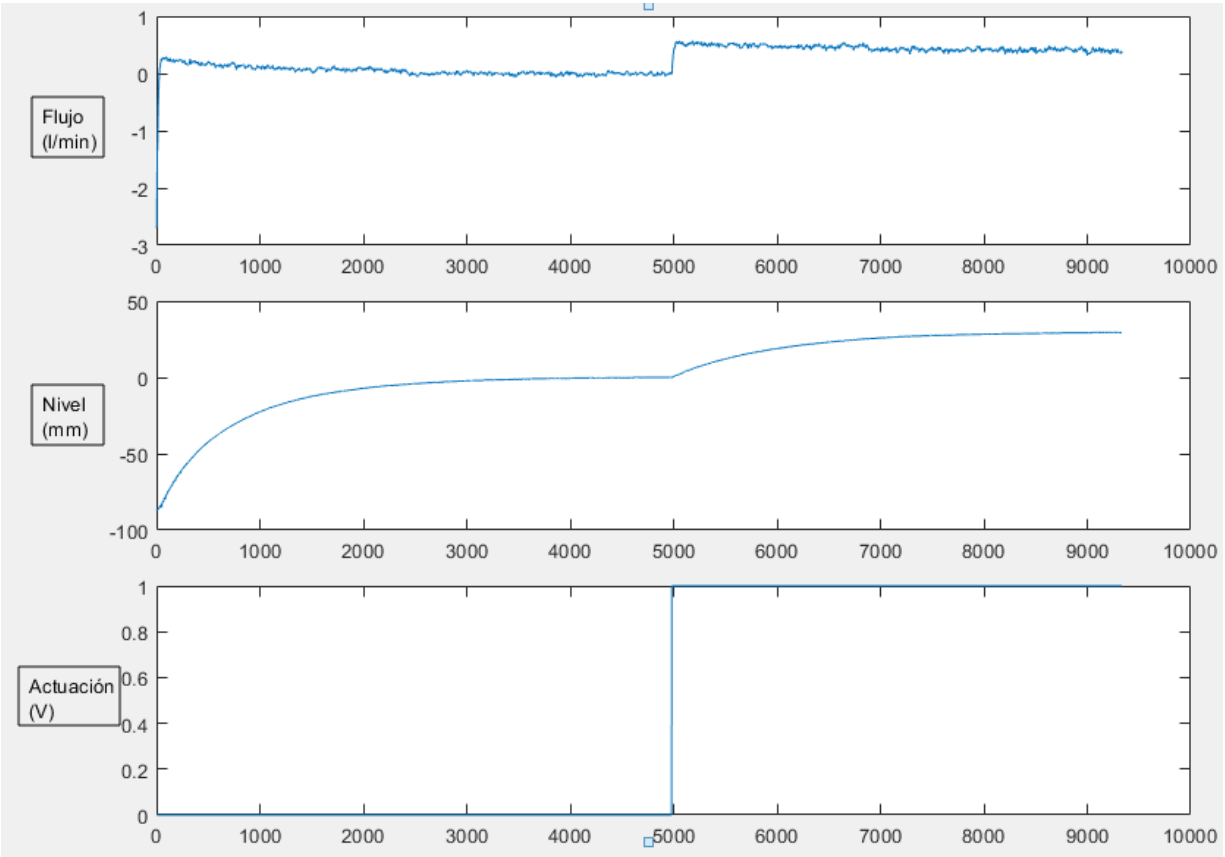
Figura 2-25. Gráficos de sistemas de nivel y flujo.

2.4.4. Linealización de los datos para trabajar en Matlab

Ya finalizada la práctica para la obtención de la función de transferencia se procede a linealizar la tabla generada con los datos de LabVIEW. Todo esto con el propósito de trabajar un sistema no lineal como un sistema lineal dentro del punto de operación, para tener el menor error posible en Matlab, esto debido a que los datos generados por la prueba sirven para poder graficar el comportamiento del sistema y no para utilizarlos dentro de la aplicación Ident.

Para ello, a la tabla generada con todos los datos de la actuación, el tiempo y la medición de los sensores se traspasan a otra tabla que se utilizará dentro del software. A los valores de la actuación se restará a todos los datos el escalón inicial el cual es de 6,5, esto genera valores de entre los 0 y 1. Para los sensores de nivel y flujo se le resta el valor que tiene cada uno en el punto donde se presenta el cambio en el escalón desde los 6,5V a los 7,5V, para el sensor de flujo será de 2.864 l/min y para el sensor de nivel será de 99,350 mm.

Esto genera que los datos que se utilizarán se muestren de la siguiente forma dentro de Matlab, lo que se ve reflejado en la figura 2-26.

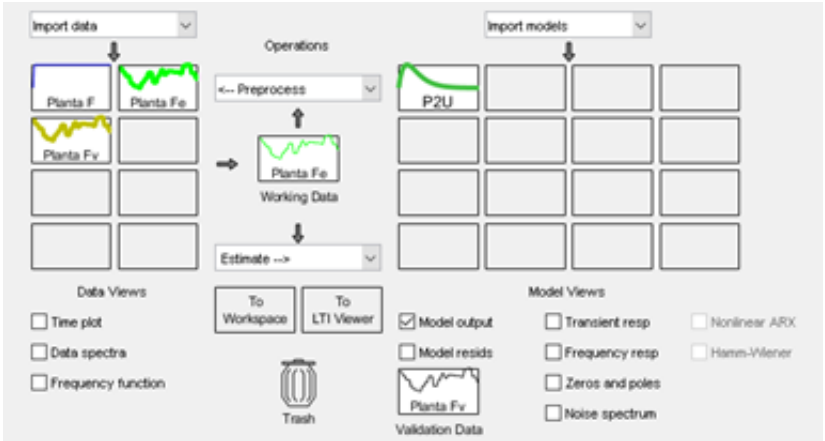


Fuente: Captura de pantalla obtenida dentro de Matlab.

Figura 2-26. Visualización de datos a utilizar en Matlab.

2.4.5. Aplicación de Ident en Matlab

Dentro del panel frontal de Matlab se agregan cuatro variables, la actuación del motor, el tiempo total que tomo la prueba, la señal de medición de nivel y la señal de medición de flujo. Se escribe el comando Ident en el panel y se abre un panel de identificación de sistemas como el de la figura 2-27, los datos se importan en el dominio del tiempo y se generaran dos funciones de transferencia, del subsistema de flujo y subsistema de nivel.

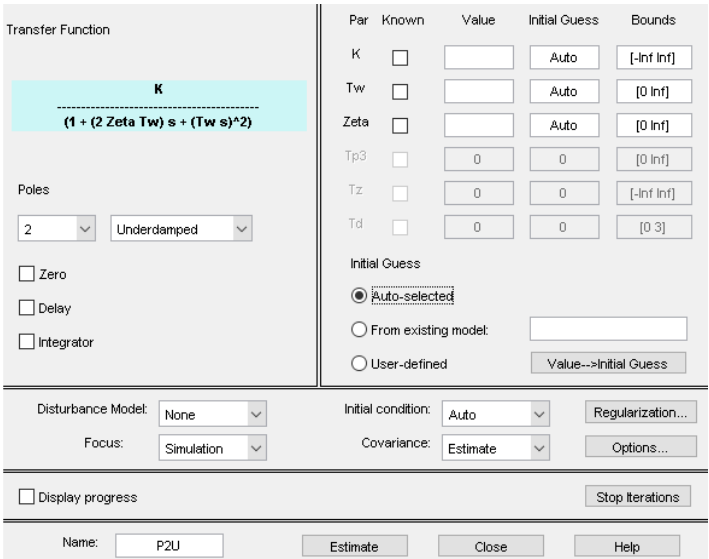


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-27. Panel de Identificación de sistemas.

2.4.5.1. Función de transferencia de subsistema de flujo

La planta de flujo se obtiene con los datos de actuación y los datos de la respuesta de flujo, después de importar la actuación y la respuesta de esta planta, se selecciona el rango de valores que se desean para trabajar y validar la señal. Se estima la función de transferencia mediante un modelo de procesos mostrado en la figura 2-28,



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-28. Modelo de procesos para identificación de función de transferencias.

Sabiendo que la señal generada en el sistema de flujo es de segundo orden y que no tiene retardo debido a que al enviar un escalón de referencia inmediatamente se obtiene una función de transferencia de la siguiente estructura:

$$G(s) = \frac{K * Wn^2}{s^2 + (2 * \xi * Wn)s + Wn^2}$$

Al estimar la función y el software entrega tres valores los cuales son:

- K ganancia continua de la planta = 0,52588
- Tw (Wn) Frecuencia natural= 0,68025
- Zeta (ξ) Factor de amortiguamiento= 1,041

Reemplazando en la estructura de la función de transferencia se obtiene que la función del subsistema de flujo queda constituida como:

$$G_F(s) = \frac{0,2433457}{s^2 + 1,441628s + 0,46274}$$

2.4.5.2. Función de transferencia de subsistema de nivel

La planta de nivel se genera respecto a la respuesta del subsistema de flujo y la respuesta del subsistema de nivel, esto se debe a cómo se relacionan los dos subsistemas para poder controlarlos con un solo actuador. La respuesta de la planta del flujo es la excitación de la planta de nivel para poder controlar las variables.

La función de transferencia que se obtiene de manera similar, con la diferencia que se utiliza como actuación a la señal de flujo y su salida la señal de nivel, como se mencionó, ya que la señal es de primer orden, la aplicación Ident entrega una función con la siguiente estructura:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Los valores al estimar la función son:

- K ganancia continua de la planta= 30,878
- Tp1 (τ) constante de tiempo= 105,44

Teniendo los valores se reemplazan, obteniendo la función de transferencia de nivel de la siguiente forma:

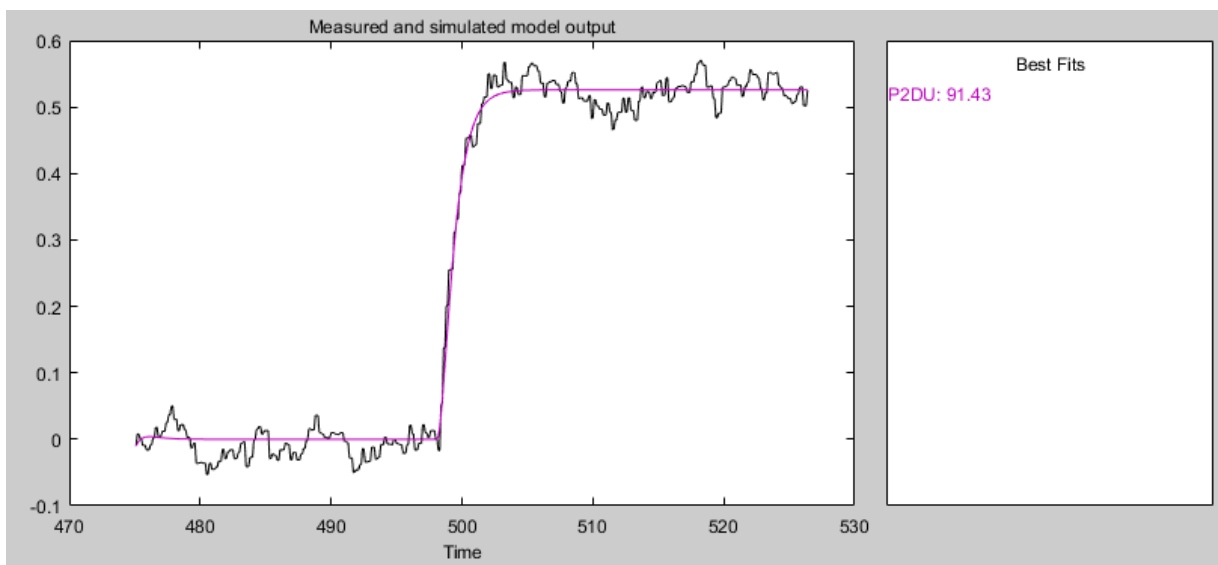
$$G_N(s) = \frac{30,878}{105,44s + 1}$$

2.4.5.3. Ratificación de funciones de transferencia de flujo

Se observa el porcentaje de asertividad de la función de transferencia de flujo con la opción Model output de la aplicación Ident, la cual se muestra en la figura 2-29, se observa que el modelado de la función de flujo tiene un 91,43% de asertividad y se ratifica la función con la multiplicación entre ΔU y ΔY , observar si K es equivalente con la obtenida en Matlab y si el factor de amortiguamiento concuerda con lo observado en la gráfica.

$$\begin{aligned}\Delta u &= 7,5 - 6,5 = 1 \text{ v} \\ \Delta y &= 3,394 - 2,869 = 0,52 \text{ l/min} \\ K &= 1V * 0,52 = 0,52 \approx 0,52588\end{aligned}$$

Se observa en la gráfica que la señal de flujo es sobre amortiguado, lo que conlleva a tener un valor de ξ por encima de 1 y el factor de amortiguamiento generado es de 1,041 que concuerda con la teoría.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-29. Modelado de flujo.

2.4.5.4. Ratificación de función de transferencia de nivel

Se verifica el porcentaje de asertividad de la función de transferencia de nivel, esta se obtiene de la misma forma que en el flujo, con la opción Model output de la función Ident, la cual se muestra en la figura 2-30, se ve que el modelado de la función de nivel es de un 97,99%. Este porcentaje es muy aceptable y se ratifica la función con la multiplicación entre ΔY y ΔU y mirar si el valor de la constante de tiempo concuerda con la gráfica.

$$\Delta u = 7,5 - 6,5 = 1 \text{ v}$$

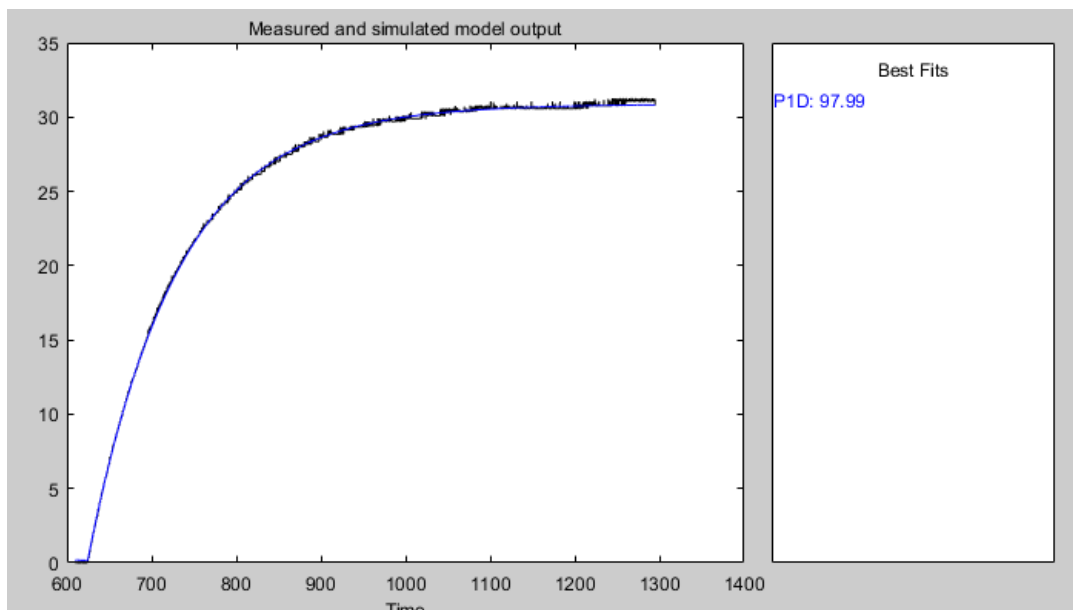
$$\Delta y = 128,872 - 99,211 = 30,806 \text{ mm.}$$

$$K = 1V * 30,806 = 30,806 \approx 30,878$$

$$1\tau = 63,2\% \text{ de } y(t) \text{ en estado estacionario}$$

$$0,632 * 30,806 = 19,1921 \text{ mm}$$

Al observar el gráfico 2-30, se puede observar que los 19,1921mm están aproximadamente a los 105(s) desde que se comienza en los 630 (s) aproximadamente y k es casi idéntico al K obtenido por la aplicación Ident, lo que significa que la planta generada concuerda con los datos de los gráficos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-30. Modelado de nivel.

Con las funciones de transferencias obtenidas y ratificadas se procede a los controladores para cada subsistema.

2.5. OBTENCIÓN DE CONTROLADORES

La sintonización de un controlador para un sistema de control retroalimentado es la determinación y regulación de parámetros del controlador con el fin de lograr implementar un control robusto de las variables en el proceso. Que sea robusto se define como la estabilidad de las variables del proceso a pesar de los cambios o perturbaciones que pueden entrar al sistema, una rápida respuesta ante los cambios de set point, oscilaciones mínimas y un error acumulado en el tiempo mínimo o deseable 0.

Para conseguir este control se utilizarán en cada variable un control PID del cual se ha mencionado anteriormente. El control PID (proporcional, integral y derivativo) es el algoritmo de control más utilizado en la industria, este control consiste en la determinación de distintos parámetros (K_p , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad. A fin de poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la función de transferencia del proceso, ya realizado con anterioridad, a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado.

2.5.1. Controlador de subsistema de flujo

En primer lugar, se debe determinar el tipo de controlador a utilizar en la variable de flujo, este sistema responde rápidamente. La dinámica presente en el proceso se debe principalmente a la velocidad de respuesta en el funcionamiento de la bomba de agua, debido a esto se recomienda un controlador PI, ya que la parte integral se hace necesaria para eliminar el error de estado estacionario, mientras que la parte derivativa se omite debido a que el flujo que circula por el interior de las tuberías es generalmente turbulento y desordenado, lo cual genera una señal retroalimentada fluctuante, aún en condiciones de flujo estable. Como es bien sabido, la acción derivativa del controlador tiende a amplificar las fluctuaciones rápidas y el ruido de la señal retroalimentada, comprometiendo la estabilidad de la respuesta en lazo cerrado.

Por otro lado se debe determinar el método de sintonización de controladores, hay varios métodos que se pueden utilizar, como el lugar geométrico de raíces que es un método computacional de simulación para encontrar los polos en lazo cerrado dependientes del valor de la acción proporcional, el método de ganancia máxima de Ziegler-Nichols, aplicable solo en plantas estables en lazo abierto donde se pueda encontrar el equilibrio oscilatorio al incrementar la ganancia, otro método es el criterio de Cohen Coon con que se conoce como sintonización de lazo abierto donde se abre el lazo cerrado y se aplica una entrada tipo escalón a la planta para poder interactuar con ella y el criterio de Ziegler-Nichols sobre la curva de reacción, procedimiento parecido al criterio de Cohen Coon con la diferencia que también considera plantas con retardo.

Se utiliza el criterio de Cohen Coon, ya que el criterio de ganancia máxima de Z-N no se puede realizar porque nunca podrá encontrar el equilibrio oscilatorio para un valor de K_p y el criterio de curva de reacción no contiene un retardo y porque este criterio se utiliza para la eliminación de perturbaciones que es exactamente lo que se busca con el controlador de flujo.

Se comienza aplicando un escalón de valor de 1 l/min a la planta, ya que se está trabajando con un sistema lineal, se comienza trabajando con los polinomios del denominador y utilizar fracciones parciales con el fin de trabajar en plano del tiempo y obtener la primera y segunda derivada de la planta.

$$G_F(s) = \frac{0,2433457}{s^2 + 1,441628s + 0,46274}$$

Se obtienen las raíces y se aplica la referencia $R'(s)$ tipo escalón.

$$Y_F(s) = \frac{0,2433457}{s^2 + 1,441628s + 0,46274} * \frac{1}{s}$$

$$Y_F(s) = \frac{0,2433457}{s(s + 0,48233376)(s + 0,9592942)}$$

Como se mencionó anteriormente, se aplican fracciones parciales con el fin de poder trabajar en el plano del tiempo la función.

$$Y_F(s) = \frac{0,2433457}{s(s + 0,4823337648)(s + 0,9592942)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + 0,48233376} + \frac{C}{s + 0,9592942}$$

$$Y_F(s) = \frac{0,52592122}{s} - \frac{1,05778438}{s + 0,48233376} + \frac{0,5318546921}{s + 0,9592942}$$

Aplicando la inversa de Laplace se obtiene la siguiente ecuación:

$$y_F(t) = 0,52592122 - 1,05778438e^{-0,48233376t} + 0,53185469e^{-0,9592942t}$$

Obteniendo la ecuación en función del tiempo se procede a obtener la primera y segunda derivada con el fin de sacar el tiempo en el punto de inflexión, la pendiente en este punto y el valor de y en el tiempo de este punto.

$$\begin{aligned}\dot{y}_F(t) &= 0,5102051173e^{-0,48233376t} - 0,510205013e^{-0,9592942t} \\ \ddot{y}_F(t) &= -0,2460891526e^{-0,48233376t} + 0,4894367098e^{-0,9592942t}\end{aligned}$$

El tiempo en el punto de inflexión se obtiene igualando a 0 la 2da derivada, con el tiempo calculado, de la primera derivada se obtiene la pendiente y la posición de $y(t)$ en la función sin derivar, los valores son los siguientes:

- Tiempo en punto de inflexión = 1,441552821 (s).
- Pendiente = 0,126563156.
- Posición $y(t)$ = 0,131590753 (l/min).

Se procede a calcular los valores utilizados en el criterio de Cohen Coon para sintonizar el controlador los cuales son: k (ganancia del proceso), τ (constante de tiempo del sistema), T (retardo de tiempo) y B_{max} (respuesta máxima post sensor).

- Bmax:

$$B_{max} = H * y(\infty) = 1 * 0,5102051173 = 0,5102051173$$

- T:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \Rightarrow 0,126563156 = \frac{0,4269055 - 0}{1,441552821 - T} \Rightarrow T = 0,4018288037$$

- K:

$$K = \frac{B_{max}}{r'} = \frac{0,5102051173}{1} = 0,510205$$

- τ :

$$\tau = \frac{B_{max}}{m} = \frac{0,5102051173}{0,126563156} = 4,031229415$$

Después de calcular los valores iniciales para sintonizar se procede a reemplazar dichos valores en las fórmulas de la tabla 2-4, de ella solo de deben utilizar dos fórmulas, Kp y Ti del tipo de control PI:

Tabla 2-4. Fórmulas de sintonización criterio Cohen Coon.

Tipo de control	Kp	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{K * T} * \left(1 + \frac{T}{3\tau}\right)$		
P I	$\frac{\tau}{K * T} * \left(0,9 + \frac{T}{12\tau}\right)$	$T * \frac{30 + \frac{3T}{\tau}}{9 + \frac{20T}{\tau}}$	
P D	$\frac{\tau}{K * T} * \left(1,25 + \frac{T}{6\tau}\right)$		$T * \frac{6 - \frac{2T}{\tau}}{22 + \frac{3T}{\tau}}$
P I D	$\frac{\tau}{K * T} * \left(1\bar{3} + \frac{T}{4\tau}\right)$	$T * \frac{32 + \frac{6T}{\tau}}{13 + \frac{8T}{\tau}}$	$T * \frac{4T}{11 + \frac{2T}{\tau}}$

Fuente: Clase de control de procesos.

- Kp:

$$\frac{4,031229415}{0,510205 * 0,4018288037} * \left(0,9 + \frac{0,4018288037}{12 * 4,031229415}\right) = 17,86680317$$

- Ti:

$$0,4018288037 * \frac{30 + \frac{3 * 0,4018288037}{4,031229415}}{9 + \frac{20 * 0,4018288037}{4,031229415}} = 1,107466938$$

Ya teniendo los valores de Kp y Ti calculados se presenta el controlador PI que se utilizará para regular el subsistema de flujo.

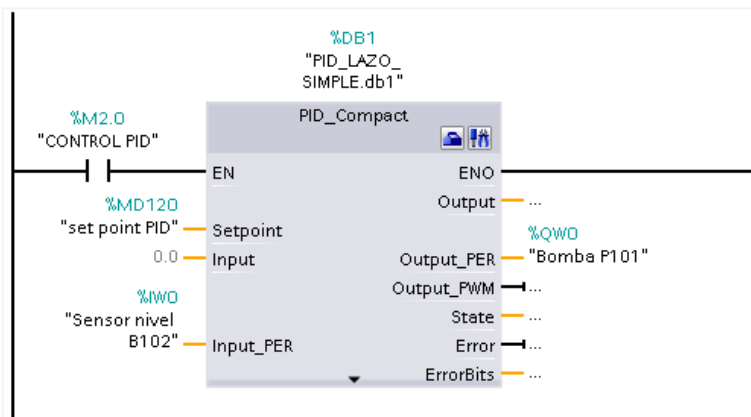
$$C_f(s) = 17,86680317 \left(1 + \frac{1}{1,107466938s} \right)$$

2.5.2. Controlador de subsistema de nivel

Para el subsistema de nivel, al igual que en el control de flujo, se utilizará un controlador PI para poder eliminar el error en estado estacionario, ya que no tiene un retardo al momento de ingresar una referencia al sistema.

Con la intención de poder aprender a utilizar otro método de sintonización se procede a utilizar un método de sintonización computacional, mediante una aplicación de sintonización incorporada al bloque PID_Compact utilizado dentro de TIA Portal.

Este bloque permite el control continuo de una variable, con una sintonización inicial que lleva a cabo la sintonización mediante la respuesta del sistema ante un escalón forzando la salida a un set point, se espera que llegue el punto de inflexión del sistema y determina las variables. En cambio la sintonización fina que se utilizó dentro de este controlador, se basa en el método de sintonización de ganancia máxima de Ziegler-Nichols, método que trabaja frente a perturbaciones. Este lleva el sistema a un estado oscilatorio y obteniendo la ganancia y periodo en este estado se calculan los parámetros PID. Además el bloque incluye la monitorización de las señales de entrada y salida, a continuación, se muestra el bloque PID_Compact.



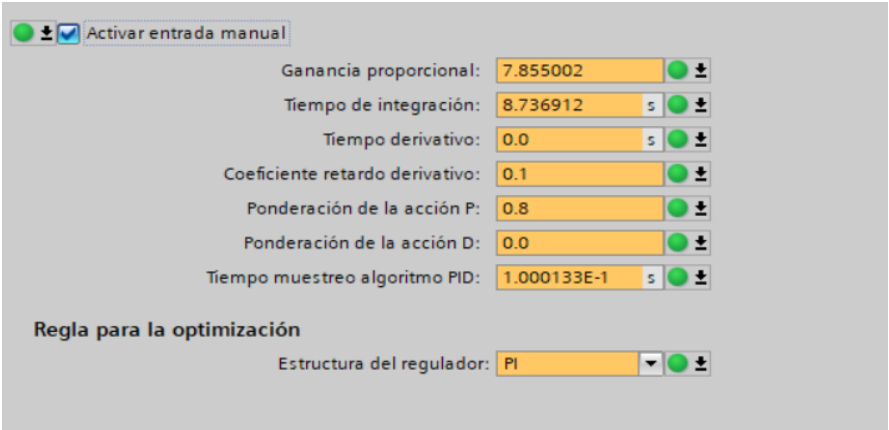
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-31. Bloque PID_Compact dentro de TIA Portal.

Para poder utilizar este bloque se necesita un setpoint, que es el nivel ingresado a una memoria (en este caso desde la memoria MD120), el cual es escalado dentro de la configuración del mismo, la señal de entrada que será el sensor de nivel que se encuentra conectado en la entrada analógica IW0 del PLC, y por último la salida que será la bomba de agua que es QW0.

Este controlador se obtendrá para la referencia de nivel de 99mm. Se realiza con esta referencia, ya que cómo es un sistema no lineal pueden haber muchos controladores para distintos puntos de referencia y como se está trabajando con un punto de trabajo de entre los 99 a los 129mm y este punto es un segmento lineal dentro de todo el rango de valores vistos, el controlador obtenido regulará correctamente para todo el rango establecido como punto de operación.

A fin de sintonizar el controlador de nivel, se debe entrar al modo de puesta en marcha que se encuentra en la esquina superior derecha del bloque, esto llevará a una ventana de monitorización de las señales donde se podrá sintonizar, en la esquina superior derecha se elige la sintonización inicial para poder arrancar el control continuo y luego de finalizar y llegar al set point propuesto se realiza la sintonización fina, para obtener los valores de la acción proporcional y la acción integral más adecuados para el sistema de nivel, como muestra la figura 2-32.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-32. Configuración del controlador Pi de nivel.

Ya habiendo obtenido los datos del controlador de nivel se procede a reemplazar en la fórmula obteniendo el controlador PI:

$$C_N(s) = 7,855002 \left(1 + \frac{1}{8,736912s} \right)$$

Con los controladores obtenidos se dan inicio a las pruebas simuladas y prácticas dentro de la planta con distintos tipos de controladores para comparar los resultados de cada uno y comprobar en el siguiente capítulo si el esquema de control en cascada es más eficaz a la hora de controlar ingresando perturbaciones.

CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

3. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

El capítulo que se presenta a continuación considera el análisis de los controladores obtenidos para cada planta en particular. Las pruebas de funcionamiento de los controladores dentro del esquema de control en cascada empleado en este trabajo de titulación se compararán con un control continuo del nivel con un controlador PI en un lazo cerrado simple. Por último, después de efectuadas las pruebas se apuntarán las observaciones respecto del funcionamiento del tipo de control desarrollado para la planta de experimentación FESTO.

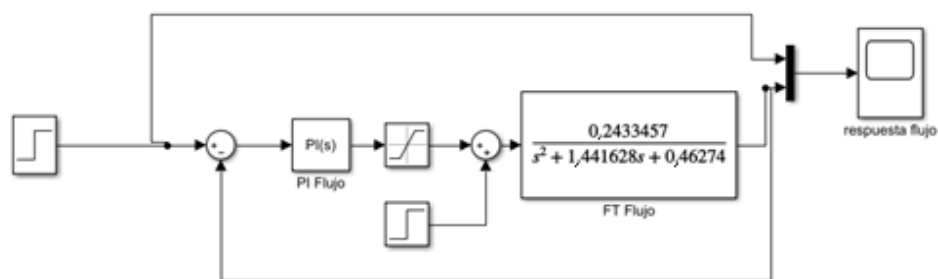
3.1. SIMULACIÓN DE CONTROLADORES

Luego de completada la sintonización de los controladores se procede a realizar una simulación de cada uno de estos dentro de la aplicación Simulink que viene incluido dentro de Matlab, la aplicación mencionada es un entorno de programación visual, que permite diseñar y simular un sistema antes de convertirlo en hardware. Se pueden explorar e implementar diseños que, de otro modo, no se podrían plantear, sin tener que redactar algún código en específico.

Todo esto tiene la finalidad de observar y comprobar el funcionamiento de cada función de transferencia junto a su controlador PID en específico, esto no quiere decir que los controladores funcionarán correctamente, ya que la simulación puede ser muy distinta a la respuesta obtenida en terreno.

3.1.1. Simulación del control de flujo

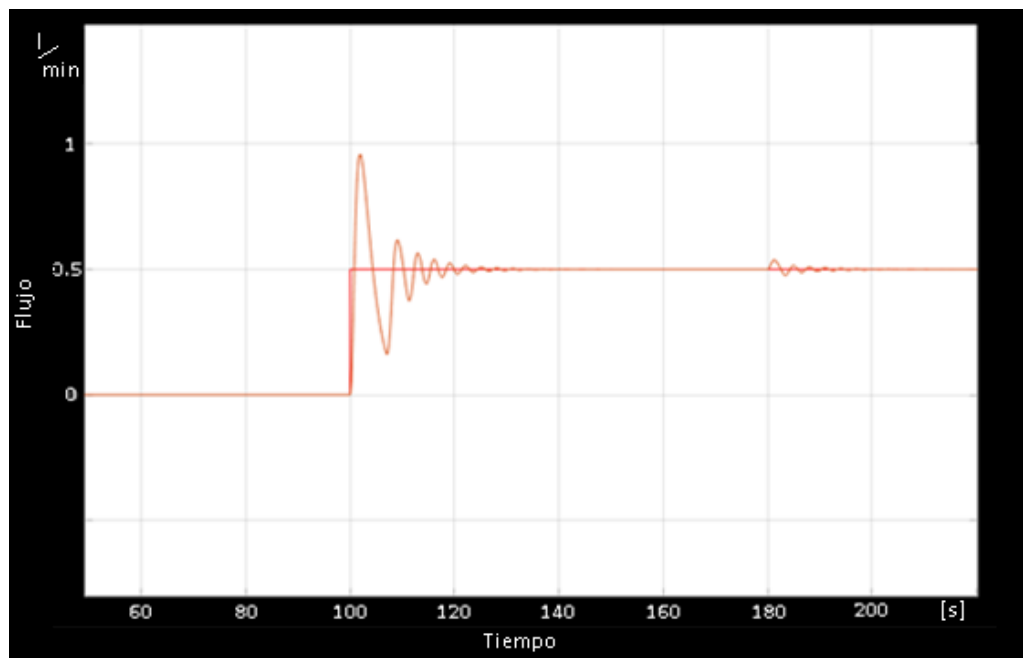
Para simular el funcionamiento del controlador de flujo se procede a generar dentro de Simulink el diagrama de bloques en lazo cerrado (apreciado en la figura 3-1), donde su entrada es un escalón con un valor inicial de 0[l/min] y un valor final de 0,5[l/min] por la diferencia de los 2,869 [l/min] y 3,394[l/min] Aproximadamente que se generan por el punto de operación. Estos valores son resultados obtenidos del sistema en el estado estacionario con la prueba de los escalones para generar la función de transferencia, además contiene un bloque de saturación de 0 a 10 V, los bloques del controlador PI, el bloque que contiene de la planta y un segundo bloque escalón donde se producirá un error de 0,7[l/min]. Finalmente tendrá un bloque llamado scoup para poder observar la respuesta y la referencia entregada. A continuación, se muestra el lazo cerrado utilizado dentro de Simulink.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1. Lazo cerrado del sistema de flujo.

Se realiza la simulación, para poder observar la respuesta que se produce con el control continuo obtenido por los valores calculados con el método de Cohen Coon se abre el bloque scoup, este muestra la gráfica, cual se visualiza en la figura 3-2.



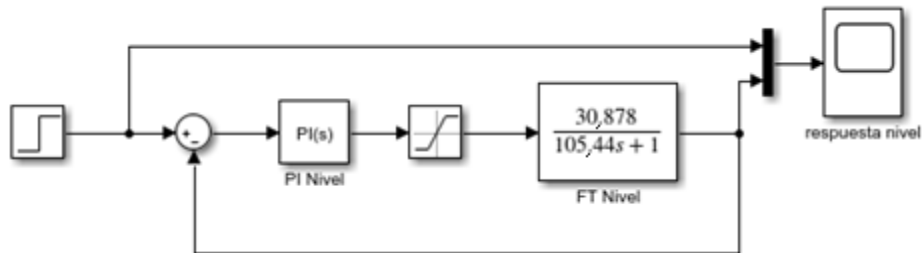
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Respuesta de la simulación del sistema de flujo.

Al analizar la respuesta del sistema de flujo con el bloque PI integrado se observa que el peak de sobre impulso va disminuyendo por que el pico que se genera es de 0,4667 [l/min] sobre la referencia y el segundo peak es de 0,1133 sobre esta, el cual es ¼ de su valor y llega al estado estacionario sin error acumulado en el tiempo. El overshoot se encuentra en la señal debido a que el método de sintonización está diseñado así para controlar frente a perturbaciones que se generen. La última oscilación se produce por el error que se genera por el segundo bloque escalón, a los 180 segundos, con una amplitud de 0,6 [l/min] y se aprecia que puede controlar el error, ya que lo elimina en aproximadamente 15 [s]. La simulación muestra que la acción proporcional levanta adecuadamente la señal al set point y la acción integral que eliminará el error en estado estacionario en caso de alguna perturbación controlando la planta.

3.1.2. Simulación del control de nivel

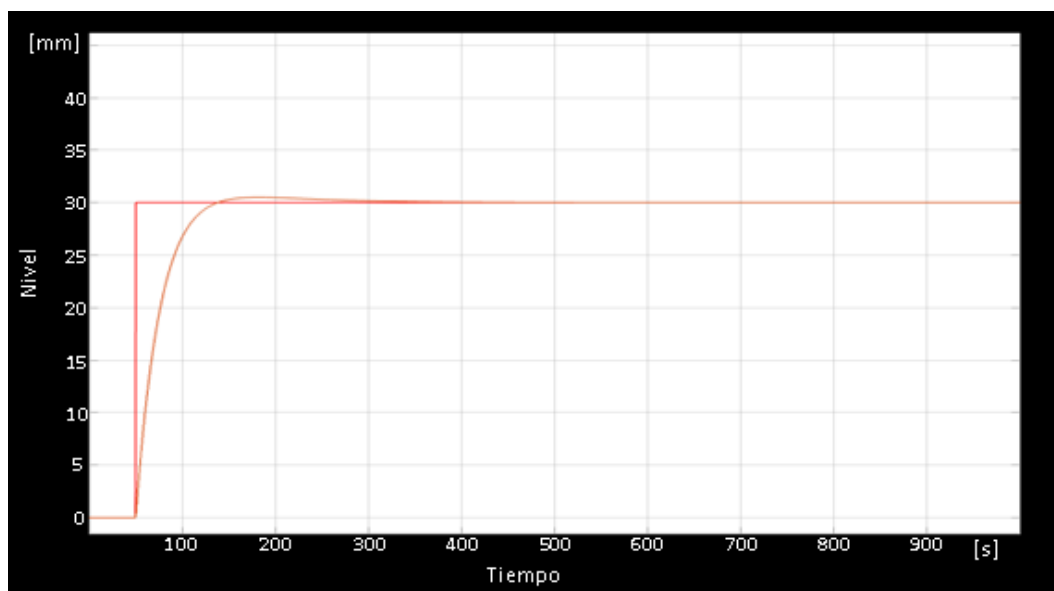
Se procede a realizar los mismos pasos que se utilizaron en el subsistema de nivel para poder realizar la simulación y probar el controlador, se utiliza el siguiente lazo de control de la figura 3-3 para realizar las pruebas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Lazo cerrado simple de subsistema de nivel.

El lazo cerrado contiene un bloque que ingresa un escalón de 0[mm] a 30[mm] por la diferencia entre 99[mm] y 129[mm] generados del punto de operación, los cuales son los datos obtenidos del sistema en estado estacionario sacado de la misma prueba mencionada en la simulación del sistema de flujo, el mismo bloque de saturación, el bloque de la función de transferencia y por último el visor para representar la respuesta de la planta respecto al escalón de referencia en la figura 3-4.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-4. Respuesta de la simulación del sistema de nivel.

Viendo el gráfico de la respuesta en la simulación se observa que el nivel responde adecuadamente con el criterio de sintonización de Ziegler-Nichols de ganancia máxima que responde a perturbaciones, tiene un pequeño overshoot que se controla rápidamente por la

acción integral y posee constante de tiempo de asentamiento físicamente adecuado respecto a la bomba que se utiliza, ya que entrega 4,3 [l/min] como máximo, por lo que el nivel de agua dentro del estanque no subirá rápidamente.

De cualquier forma, las simulaciones pueden no concordar con el trabajo práctico, el que se evaluará y se comparará después de la implementación del esquema en cascada.

3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA EN CASCADA DENTRO DE PROGRAMA DE CONTROL

La implementación del esquema de control en cascada dentro de programa de control se debe ejecutar dentro de un bloque llamado *cíclica interruptor*, el cual es un bloque de programas que se ejecuta cíclicamente sin interrupciones cada 0,1(s), configurado al momento de insertar el bloque, esto debido a que se necesita que los bloques PI trabajen constantemente sin interrupciones. Para poder ejecutar el esquema en cascada, primero se debe tener en cuenta el orden en el cual deben estar implementados los bloques PID_Compact, tal como lo muestra la figura 3-5, en primer lugar debe ir el bloque del lazo de control maestro o lazo de control externo que es quien controla el set point principal, en este caso el nivel del estanque B102, el output de este bloque PI va directo a una constante con la que se relaciona el nivel del estanque con el flujo del agua, por último desde dicha constante va al setpoint de flujo que controla la velocidad del motor desde su salida.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-5. Orden de bloques PID_Compact dentro de programa de control.

Para el bloque PID_Compact de nivel y de flujo se configura internamente la escala de medición, de modo que la entrada análoga del sensor vaya directa a la entrada INPUT_PER para ahorrar la complicación de escalar los datos y utilizar las opciones que componen la configuración interna del bloque de control.

La escala del bloque de nivel va hasta los 300 [mm], debido al nivel máximo dentro del estanque de agua B102. A diferencia del control de nivel, para el flujo se utiliza un máximo de 10 [l/min], el cual es el flujo máximo que debería entregar la bomba visto en las características técnicas de esta. Estas escalas se pueden visualizar en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Escala para bloque PID de nivel.

	Escalado de entrada de nivel		Escalado de entrada de flujo	
	valor real (mm)	Valor analógico	valor real (l/min)	Valor Analógico
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	300	27.648	10	27.648

Fuente: Elaboración propia.

La entrada y salida que se utiliza dentro de cada bloque PID_Compact son INPUT_PER y OUTPUT_PER respectivamente, esto se debe a que se utilizan elementos análogos que entregan un valor real y esta opción permite escalar la entrada análoga a un valor físico para el control de nivel y flujo, las entradas de cada bloque tendrán los sensores análogos, el sensor opto electrónico para el bloque PID de flujo y el sensor ultrasónico para el PID de nivel (sensores ya mencionados con anterioridad) y para la salida del control en cascada la bomba de agua.

La constante entre los bloques PID se debe utilizar debido a que si no se relacionan los controladores de flujo y nivel ejecutarán su trabajo erróneamente generando distorsión en el funcionamiento de la bomba o simplemente esta no partirá, para eso hay que seguir los siguientes pasos:

- Enviar un dos setpoint de porcentaje de distintos niveles para ver a cuanto nivel produce cada uno y ver qué porcentaje de trabajo tiene la bomba de agua.
- Buscar el flujo de agua que pueden producir los niveles encontrados anteriormente.
- Generar la constante que satisfaga los valores de nivel y flujo establecidos.

Para el caso de la planta FESTO se genera una tabla con los valores encontrados enviando un set point de un 33% y un 43% de nivel dentro del estanque, para así tener el porcentaje de trabajo el nivel de estanque y el flujo del agua con el que se relaciona cada punto de nivel, con el fin de generar la constante. Estos valores se presentan a continuación en la tabla 3-2.

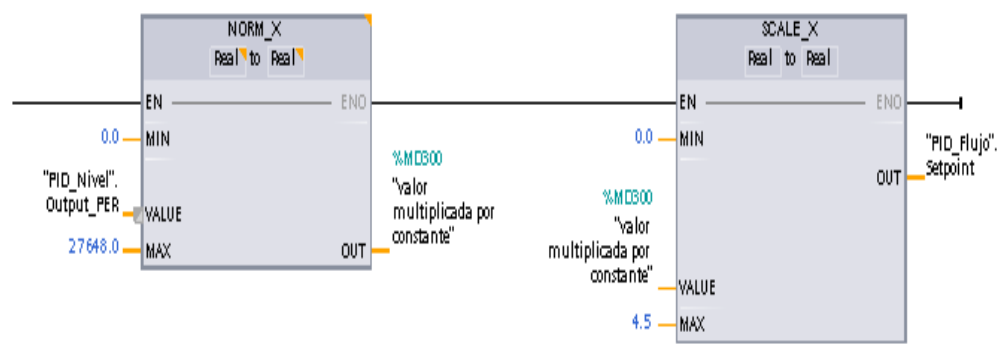
Tabla 3-2. Datos para la relación de nivel y flujo.

	Set point (%)	Nivel (mm.)	Flujo (l/min)	Trabajo de bomba (%)
Prueba 1	33	99	2,869	65
Prueba 2	43	129	3,394	75

Fuente: Elaboración propia.

Para generar la relación mostrada en la tabla 3-2 se utilizan dos bloques que se aprecian en la figura 3-6, se conectan directamente en la salida OUTPUT_PER del bloque PI de nivel, el primero es el bloque NORM_X el cual normaliza el valor que entra, el cual es entre 0 y 27648 a

un valor entre 0 y 1, y el segundo bloque se denomina SCALE_X que es el valor normalizado que entra lo escala entre los valores de 0 y 4,5 [l/min], que son el rango de flujo con que trabaja la bomba de agua.

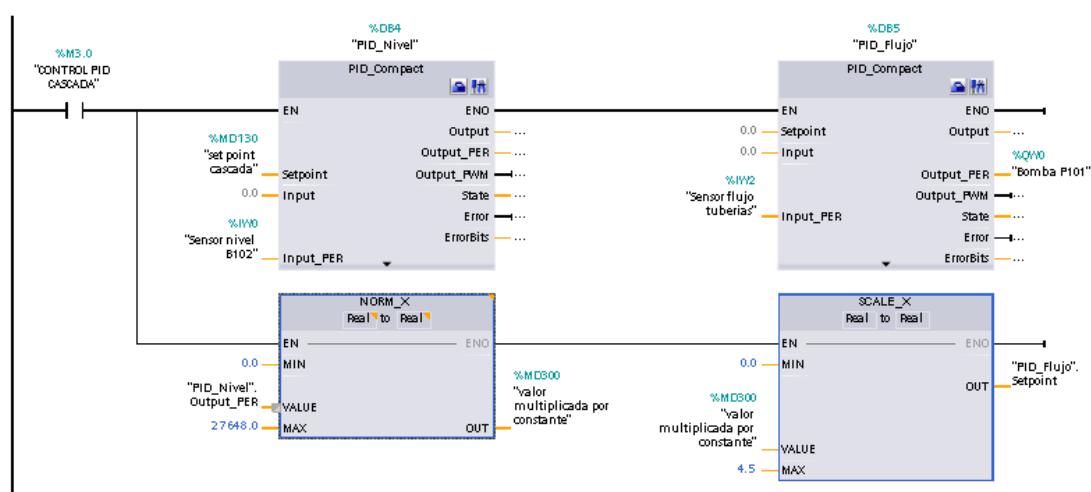


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-6. Bloques de relación entre PID de nivel y flujo.

Ya con los bloques escalados, y los bloques generados para la relación se procede a efectuar el control en cascada como se muestra en la figura 3-7, se realiza una prueba rápida de trabajo en donde se introduce como set point el valor de 99 [mm] y 129 [mm], los cuales son los valores de nivel entregado por los porcentajes trabajados para la relación y se observa que efectivamente, en esos niveles la bomba entrega un flujo de 2,869 [l/min] y 3,394 [l/min] respectivamente, verificando el correcto funcionamiento del control continuo con un esquema en cascada.

Con esto el control queda preparado para realizar pruebas con la intención de comparar con el control en lazo simple, pero antes de poder realizarlas se producen las imágenes de muestra de las señales del lazo de nivel y de flujo dentro del interfaz HMI para visualizar las variables mientras el control de estas se ejecuta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-7. Esquema de control en cascada con bloques PID_Compact.

3.3. IMPLEMENTACIÓN DE GRÁFICAS DE SEÑALES DE LAZOS DE CONTROL EN EL ENTORNO HMI

Como se mencionó anteriormente, dentro de la programación del PLC se generarán imágenes con gráficos para la pantalla HMI, las imágenes intercomunicarán distintas variables desde dicha pantalla con el control de los sistemas que va dentro de la memoria de la CPU del controlador lógico programable, esto con el fin de poder amenizar la introducción del set point de nivel deseado para el estanque B102, mostrar el estado de los estanques y visualizar las señales entregadas por los lazos de control de nivel y flujo.

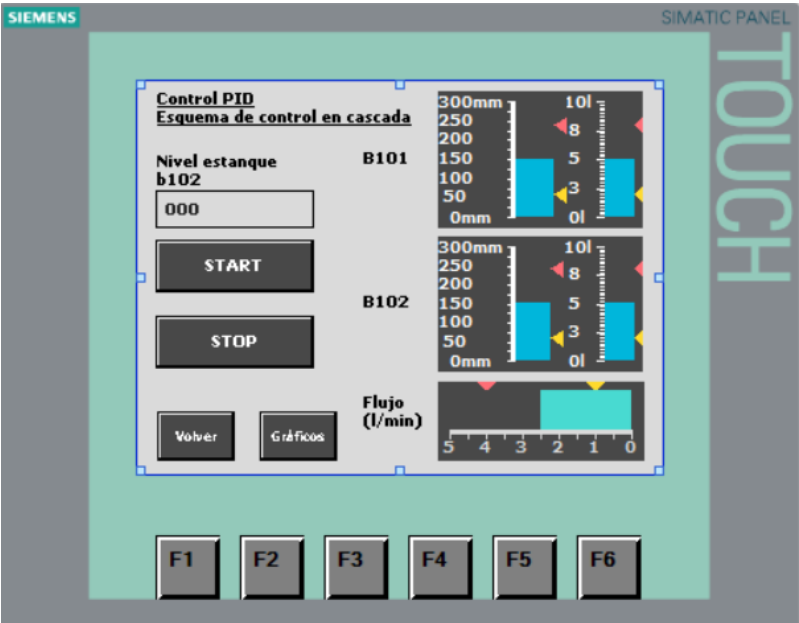
El programa para la pantalla HMI generado consta de 6 imágenes con gráficos, el primero es la imagen raíz de la pantalla, dicho de otra forma, es la pantalla principal al iniciar todo donde se presenta el trabajo. La segunda pantalla que se ve en la figura 3-8 presenta la elección del tipo de control que se quiere ejercer a las variables, que son el control ON/OFF (solo para las pruebas en lazo abierto), el control PID de lazo cerrado simple y el control PID con el esquema en cascada. También presenta la activación de los relés que permiten el funcionamiento de la bomba de agua en modo análogo y de la apertura de la válvula de dos vías para el paso de agua por el circuito de tuberías.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-8. Imagen de elección de control para pantalla HMI.

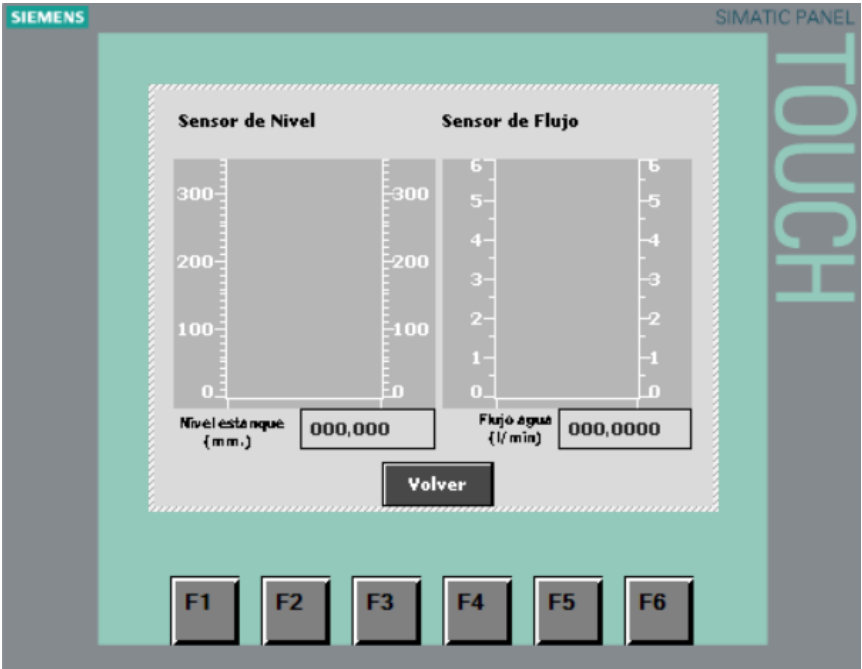
Después de la imagen de elección del controlador vienen tres imágenes similares a como la que se presenta en la figura 3-9, estas son las imágenes para cada tipo de control. Cada imagen presenta una barra numérica para poder ingresar el set point de nivel deseado, los botones de start y stop de cada tipo de control, el nivel de agua en litros y milímetros de cada estanque, un visor de flujo que va de los 0 a 5 [l/min] y un botón que regresa a la elección de control y otro que envía a la imagen de visualización de señales de cada sensor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-9. Imagen de set point de control en cascada para pantalla HMI.

Por último en la figura 3-10 se presenta la visualización de las señales de flujo y nivel enviadas por los sensores acoplados al sistema de tuberías y al estanque respectivamente. Esta imagen representa la señal en una escala de 0 a 300 [mm] para el nivel y una escala de 0 a 6 [l/min] para el flujo, cada uno tiene una barra numérica para entregar el nivel y el flujo correspondiente de cada señal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-10. Imagen de visualización de señales para pantalla HMI.

3.4. ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CONTROL

En esta sección se realizarán las pruebas de funcionamiento de cada tipo de control generado para la regulación del flujo y el nivel del agua en la planta de trabajo FESTO. Se efectúa el funcionamiento con distintos sets point de nivel para cada control y se generarán perturbaciones, todo esto para analizar el comportamiento frente a algún agente externo o por perturbación, como la pérdida o ingreso de agua en el circuito de tuberías que ocasionalmente se puede originar dentro de la industria por aperturas de válvulas al realizar mantenciones o por cambio de circuitos de tuberías.

Las pruebas que se realizarán serán dos, iguales para cada control, con la válvula V112 abierta un 100%. Esta válvula es la que abre el paso del agua por la válvula de bola de dos vías para completar el camino del agua por el circuito de los estanques. Las pruebas se realizarán con dos escalones de nivel, de 99[mm] y de 129[mm] esto debido a que es el punto de operación en donde se trabaja y donde los controladores podrán ejercer bien su trabajo.

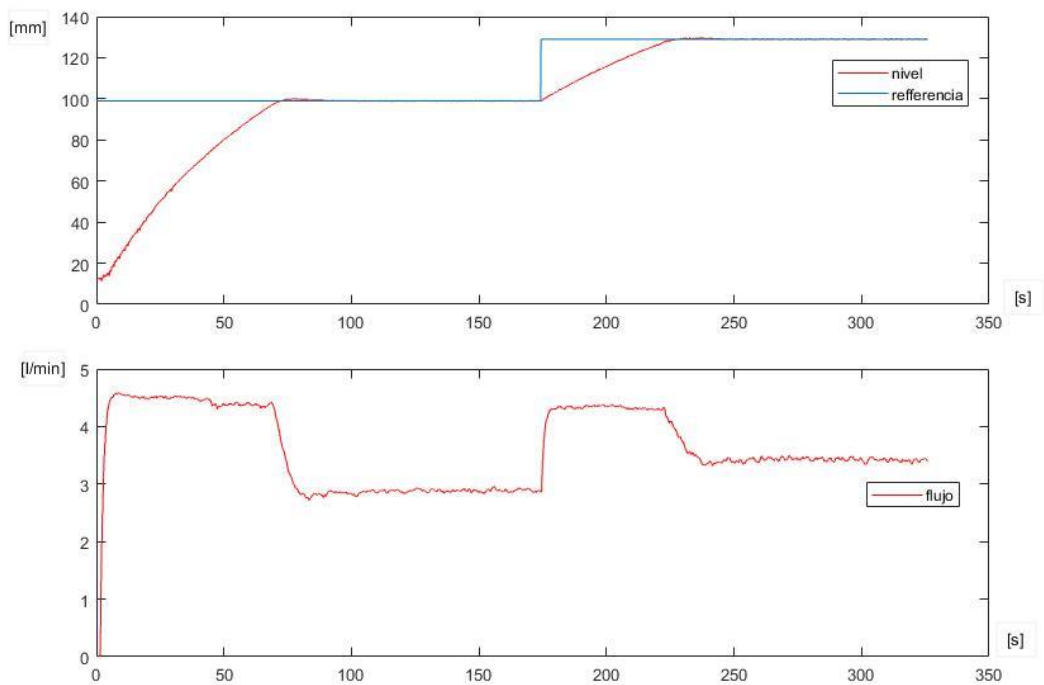
Las pruebas realizadas se nombrarán a continuación:

- Prueba de nivel ideal con cambio de referencia.
- Prueba de nivel con perturbación estable sin cambio de referencia.

3.4.1. Prueba de nivel ideal con cambio de referencia

Esta prueba tiene como fin el observar el funcionamiento de cada tipo de control en un proceso sin perturbaciones, para ver si se comporta de manera adecuada en un ambiente ideal, como set point se introducirán los escalones ya mencionados a cada control.

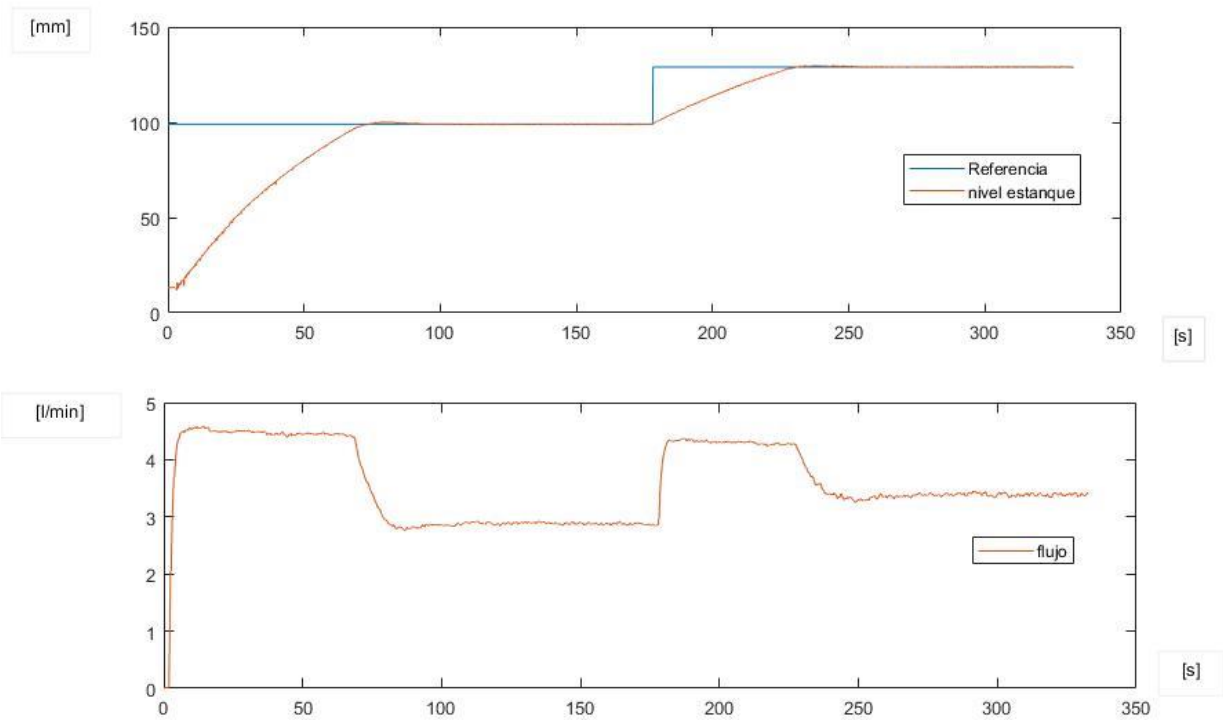
Comenzando la prueba con el control continuo en lazo cerrado simple con un regulador PI se observa que realiza un control eficaz de la variable el cual se aprecia en la figura 3-11. Este controlador disminuye el trabajo de la bomba de un porcentaje de un 100% a un 75% aproximadamente que es el trabajo que realiza dentro del punto de operación elegido, para mantener una salida constante. Además se percibe un pequeño aumento de la variación del flujo en un control PID de lazo cerrado simple respecto al control en cascada, esto debido a que no se ejerce un control sobre la variable y tiende a aumentar la perturbación dentro de ella.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-11. Prueba de funcionamiento de PI lazo simple.

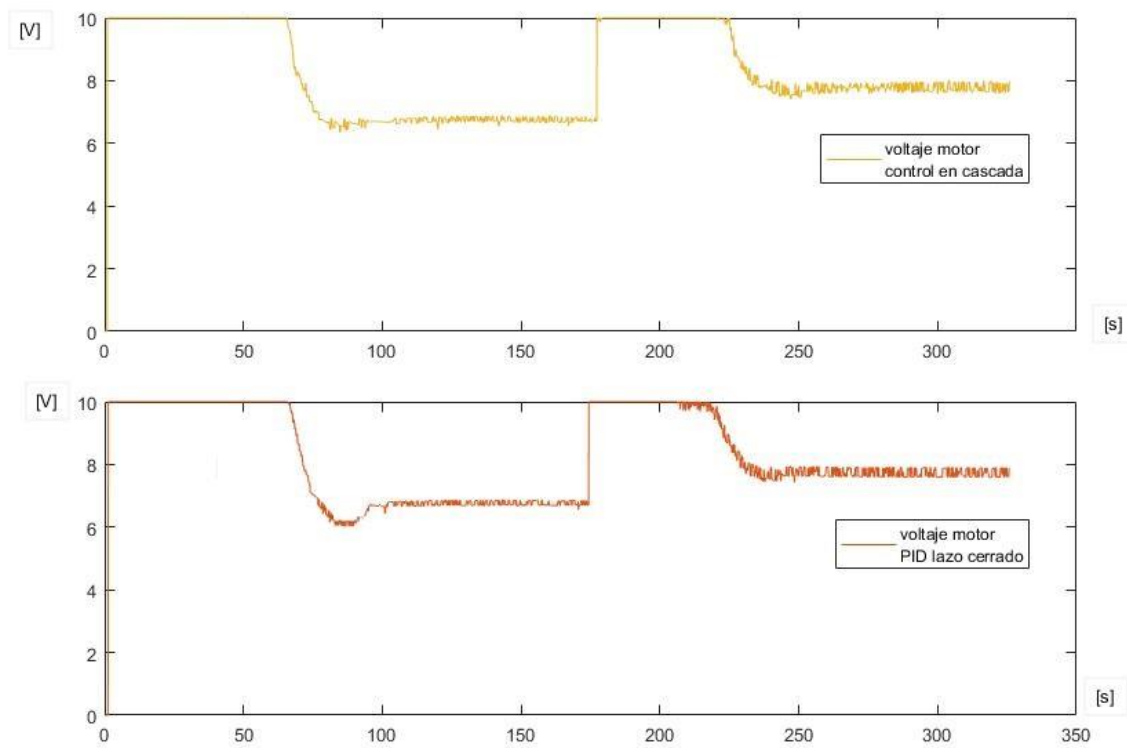
Al igual que el control en lazo cerrado simple, al utilizar un esquema de control en cascada genera un control eficaz, tanto en la variable de nivel como la de flujo, mostrada en la figura 3-12, además se observa que el trabajo de la bomba es mucho más estable respecto a la anterior prueba y el sonido emitido dentro del funcionamiento casi no tiene oscilaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-12. Prueba de funcionamiento PI en esquema cascada.

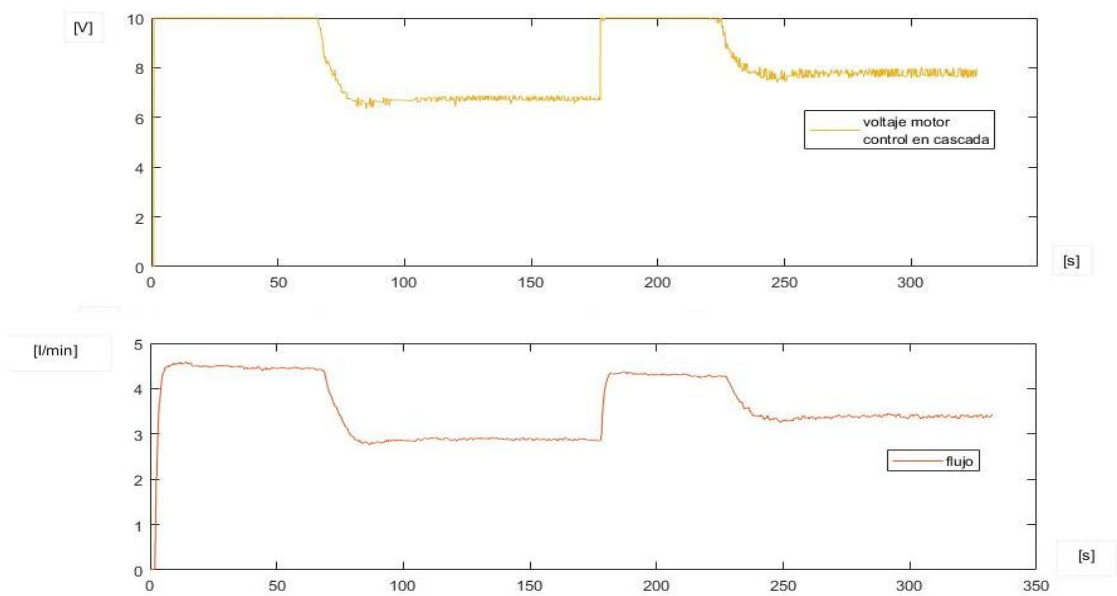
Realizando una comparación como en la figura 3-13 acerca del funcionamiento del motor en ambos tipos de control, se puede ver una diferencia en la señal de la bomba, ya que en el caso del lazo cerrado simple, la bomba tiene un trabajo un poco más inestable que en el control con un esquema en cascada, esto es posible porque el control en cascada genera una acción más veloz frente a cambios en la referencia o a las perturbaciones por el funcionamiento del lazo de control interno que es el control de flujo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-13. Comparación de funcionamientos de motor.

En la figura 3-14 se puede observar como varia el set point de la señal de flujo al momento de llegar el nivel a su estado estacionario, esto sucede para mantener el nivel del agua dentro del estanque lo más controlado posible y estos niveles en estado estacionario son de aproximadamente 65[%] y 75[%], de trabajo en la bomba, que en realidad son los 6,5[V] y los 7,5[V] de los escalones trabajados dentro del punto de operación en los 99[mm] y los 129[mm] de referencia y de 2,869[l/min] y 3,394[l/min] aproximadamente de flujo entregado por la bomba que también es el flujo de agua trabajado en el punto de operación. Se deduce que los controladores y las funciones de transferencias fueron obtenidos satisfactoriamente.

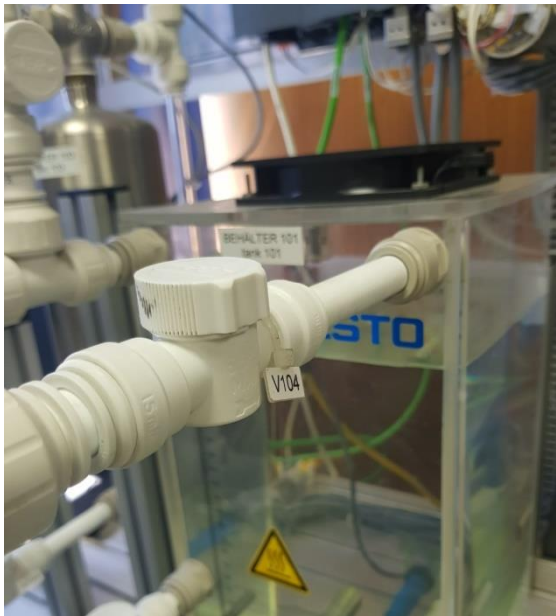


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-14. Prueba de funcionamiento PI en cascada de flujo.

3.4.2. Perturbaciones estables en estado estacionario

Esta prueba se realiza para ver si el sistema puede mantenerse controlado con una perturbación continua invariante en el tiempo, esta perturbación se efectúa con la válvula V104 (mostrada en figura 3-15), con una apertura de dicha válvula al 50% aproximadamente, para ver el comportamiento de los controladores.

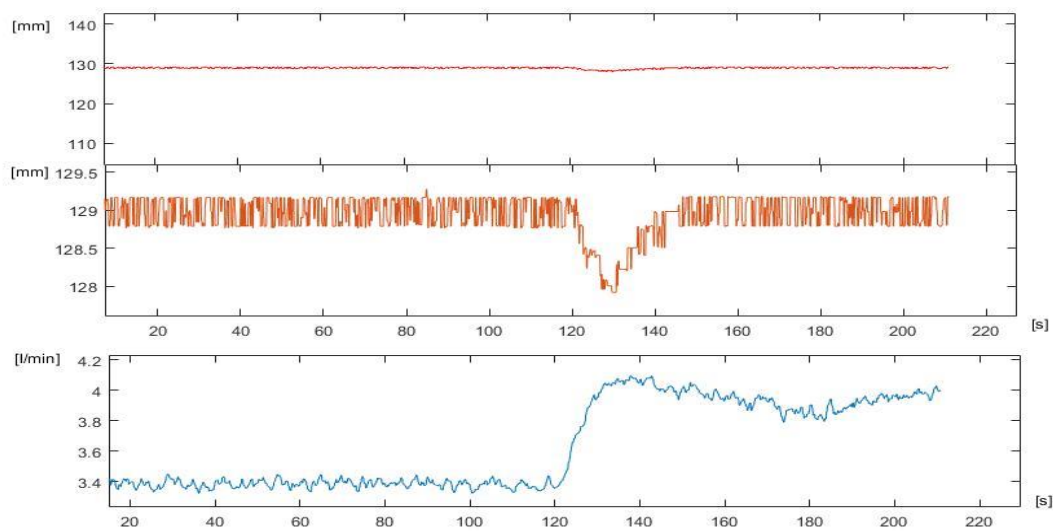


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-15. Válvula V104 utilizada para generar perturbaciones.

Como en la prueba anterior se utiliza primero el control PI de lazo cerrado simple, se realiza un acercamiento en la gráfica visualizada en la figura 3-16 y se aprecia cuando se genera la apertura de la válvula V104, el nivel del agua tiene una disminución de líquido dentro del

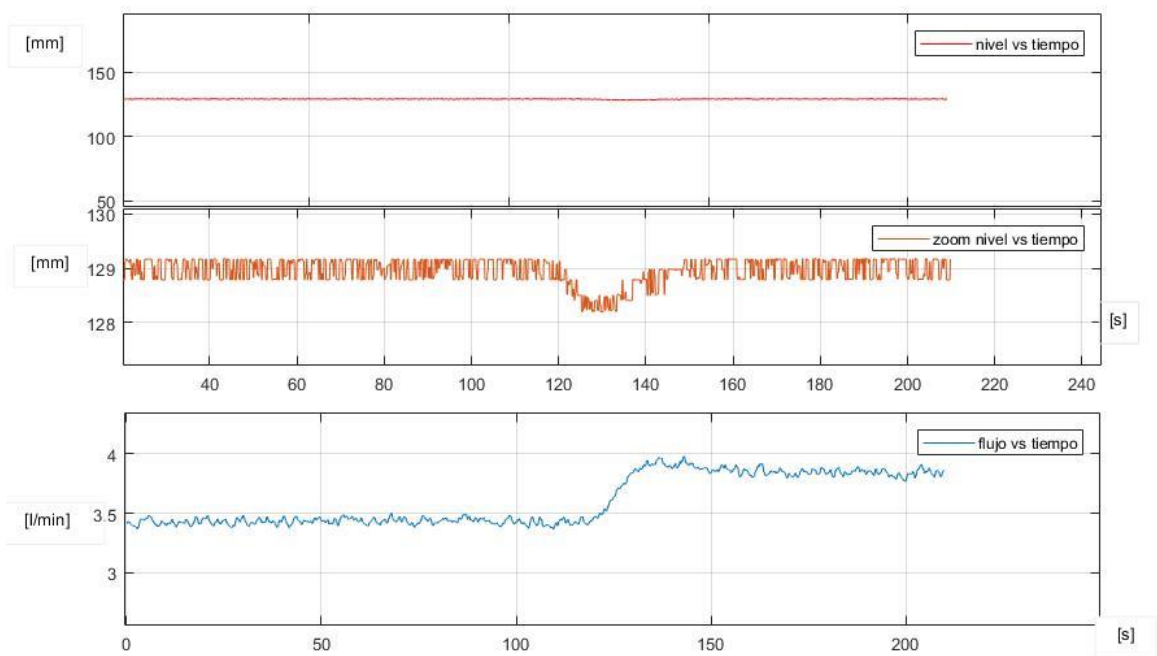
estanque, el cual es de casi 1mm, rápidamente se recupera de esta pérdida y con el aumento de porcentaje de trabajo del motor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-16. Prueba de perturbación estable en control PI de nivel de lazo cerrado simple.

Siguiendo con los controladores PI de flujo y nivel dentro del esquema en cascada, se puede verificar que actúa mejor que el controlador PI de nivel solo con el lazo cerrado simple, ya que al generar la perturbación se puede notar en la gráfica 3-17 que generó un peak menor al de su contra parte en el nivel del agua en el estanque B102 queriendo decir que controla de mejor manera el nivel ante estas perturbaciones. Además se aprecia que al tener el controlador de flujo, no permite que la variable tienda a oscilar como el control en lazo cerrado simple.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-17. Prueba de perturbación estable en control en cascada.

Gracias al ruido producido por las señales de las mediciones de los sensores que se producían en diferentes pruebas realizadas dentro de este trabajo de título se desea investigar y experimentar con algún filtro que suavice la señal entregada por el sensor el cual se verá a modo de prueba solamente en el punto siguiente.

3.5. EXPERIMENTACIÓN CON UN FILTRO EMA

Con el fin de aprender a utilizar filtros en el PLC dentro de las señales para suavizarla y no tener demasiado error, se experimenta con un filtro EMA (Exponential Moving Average), ya que al utilizarlo variarán todos los datos obtenidos dentro del trabajo y se sintonizarán nuevos controladores mediante la sintonización que provee el bloque PID en cada situación para realizarlo rápidamente. Este cambio se debe a que los sistemas de flujo y nivel se comportarán de otra forma por que la respuesta de los sensores cambiará con el filtro.

Este es un filtro exponencial empleado en electrónica digital, el cual consiste en obtener un valor de filtrado a partir de una medición mediante la siguiente expresión:

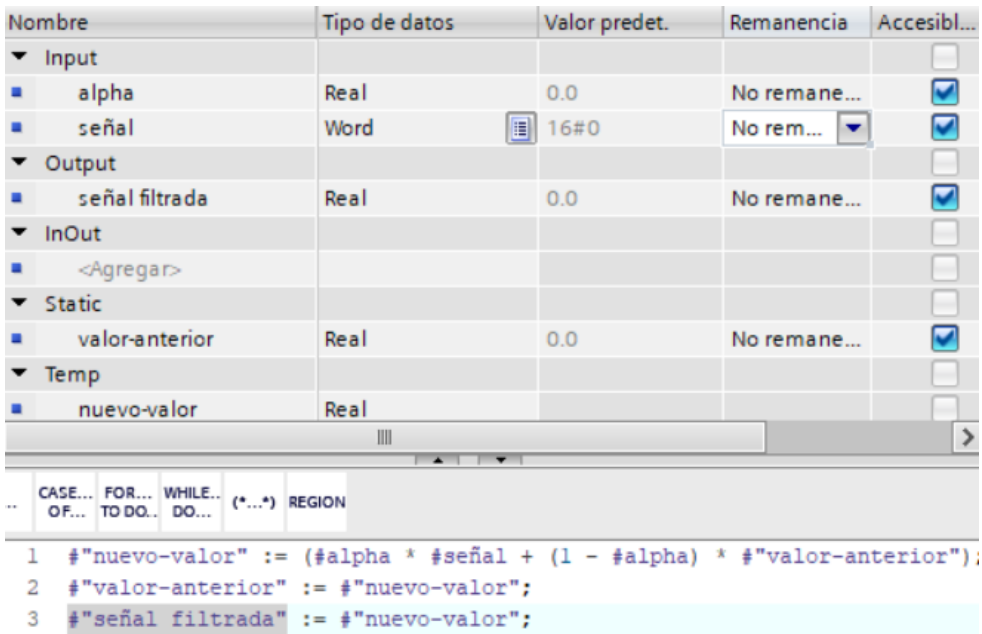
$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_{n-1}$$

Siendo los valores:

- A_n = El valor filtrado.
- M = El valor muestreado de la señal a filtrar.
- α = factor entre 0 y 1.

La señal es suavizada dependiendo del factor de α , ya que mientras menor sea este (casi tendiendo a 0) la señal será más filtrada, pero también mientras más bajo el valor la señal se verá desplazada en el tiempo, lo que sucede con la señal de los sensores, por eso se deben cambiar los valores de cada bloque PID_Compact, por que no controlarán la planta con los valores calculados anteriormente, ya que los sensores se desplazaron en el tiempo y la respuesta será un poco más lenta.

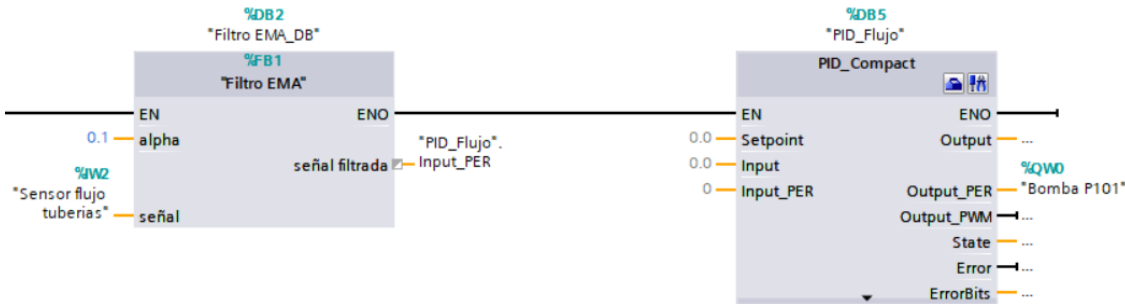
Este filtro utilizado es uno de tipo pasa bajos para eliminarlas señales de alta frecuencia y tener mejor una mejor medición, este se construyó dentro de un bloque de función FB dentro de los bloques de programa, en formato SCL (texto estructurado) para realizar de manera mucho más sencilla el filtro quedando de esta manera:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-18. Filtro EMA.

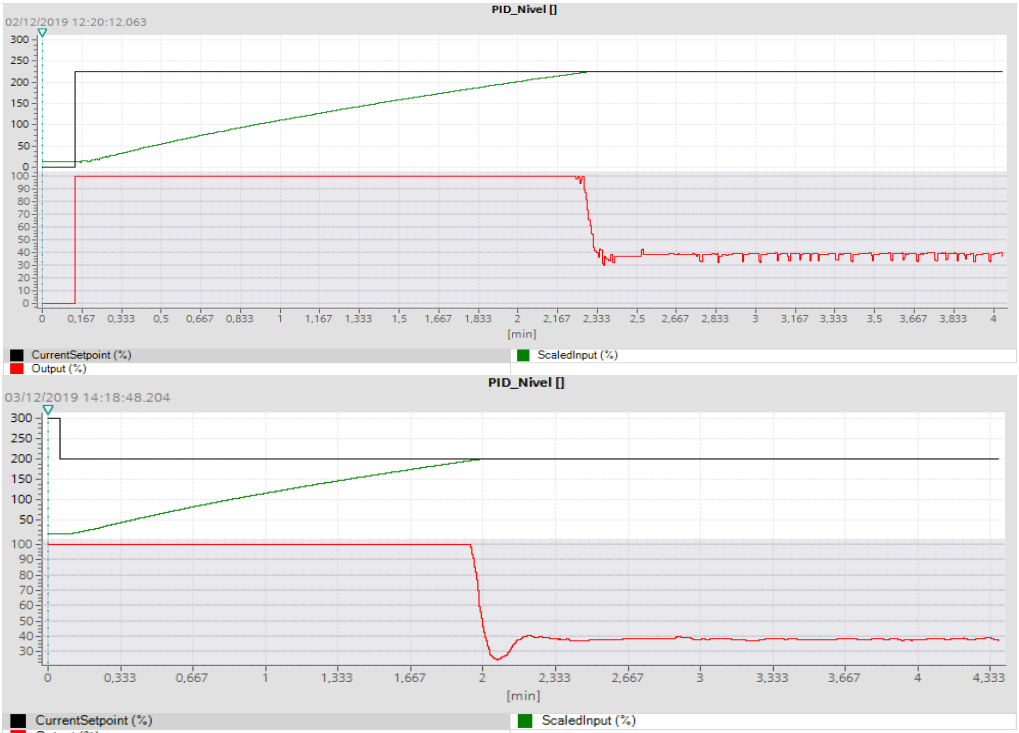
Después de tener implementada la fórmula en el bloque de función el filtro solo queda ingresar en el bloque Cyclic interrupt, dentro de las señales de los sensores, para filtrar ambas señales como lo muestra la figura 3-19:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-19. Filtro EMA implementado en señal de sensor.

Después de implementado se procede a hacer una prueba simple de funcionamiento para ver cómo se comportan las señales y se comparan con los valores obtenidos en la prueba de nivel sin perturbaciones realizadas en el control con el esquema en cascada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-20. Comparación de nivel sin filtro v/s con filtro Ema.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-21. Comparación de flujo sin filtro v/s con filtro Ema.

Como se aprecia en la figura 3-20 y 3-21, los picos que ocurrían debido a la suciedad de la señal del sensor de flujo se eliminan produciendo que el funcionamiento del motor sea mucho más estable y disminuyendo el error en estado estacionario del subsistema de flujo y por ende del subsistema de nivel respecto a la prueba anterior.

3.6. OBSERVACIONES RESPECTO A LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Después de realizadas las pruebas y comparar los resultados obtenidos queda en evidencia que entre un control en lazo cerrado simple y un control en esquema en cascada para la prueba de funcionamiento sin perturbaciones el tiempo de asentamiento es el mismo, este es aproximadamente 80 (s) aproximadamente, se debió porque tenían los mismos controladores PI de nivel, y aunque los dos tenían un overshoot pequeño, el esquema de control en cascada disminuyó en un pequeño porcentaje su valor en comparación al lazo cerrado simple, también queda en evidencia la diferencia en las pruebas con perturbaciones, el control en cascada pudo actuar más rápidamente frente a estas, en la prueba de perturbación constante donde pudo aumentar el porcentaje de trabajo más eficazmente produciendo pérdidas menores en el nivel del estanque B102, no como el control de lazo cerrado simple tuvo mayores pérdidas de líquido y por último se observó que el control en cascada disminuía los peaks producidos en el trabajo de la bomba en la prueba de funcionamiento ideal generando una acción más estable del motor.

Con esto se verifica que el control en cascada reduce los efectos de una perturbación en la variable de flujo sobre la variable de nivel, con esto se deduce que el controlador primario (controlador de nivel) recibe ayuda del controlador secundario (controlador de flujo) con ello se logra obtener un control más estable de las variables.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el presente trabajo de título fue posible poner en práctica, reforzar y perfeccionar los conocimientos y contenidos de control automático e instrumentación aprendidos a lo largo de toda la carrera cursada. Realizando un recuento de los objetivos específicos se pudieron realizar todos estos de forma satisfactoria, realizando el control en cascada de nivel y flujo con los controladores más aptos, en este caso los reguladores PI para cada caso según las características que entregaban estos sistemas, por ende, realizar el objetivo principal del proyecto el cual era aplicar un esquema de control avanzado.

Gracias al proyecto se aprendieron diversos aspectos como lo es la conexión entre diferentes softwares utilizados desde el OPC server, LabVIEW, TIA Portal y hardware que en este caso fue el PLC siemens S7-1500 y la pantalla HMI KTP600 para realizar mediciones con el fin de obtener y generar la función de transferencia mediante softwares como Matlab de un proceso industrial desde cero y efectuar el control de manera más eficaz.

Una de las recomendaciones que se pueden presentar es la de realizar una inspección y mantención de la planta experimental FESTO más profunda y con mayor regularidad, como limpieza interna de cada elemento de la estación de trabajo y al cambio del agua, esto va igualmente al resto de las plantas. Esta recomendación es debido a que a mitad del trabajo del proyecto el sensor de flujo opto electrónico comenzó a realizar mediciones extrañas y dejó de medir, porque tenía la suciedad que se produce en el agua estancada. Se debió realizar una mantención profunda del sensor para solucionar el problema con un apoyo docente. Esta recomendación es para que los elementos de las plantas puedan cumplir su vida útil de forma satisfactoria y para que los futuros estudiantes puedan realizar sus laboratorios y sus trabajos de título sin ningún problema.

Este tipo de proyectos prácticos entregados por los profesores de la carrera de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial la Universidad Técnica Federico Santa María, permiten poner en práctica lo aprendido en un entorno didáctico y así estar más preparados para las eventualidades que se pueden presentar en los futuros trabajos de ingeniero, aplicando dichos conocimientos, donde en muchas ocasiones se tendrán que resolver problemas como los generados en el sensor ya mencionado o en un control de procesos dentro de un PLC o elementos similares, utilizados para la regulación de variables pero que se tenga que salir a flote con el ingenio y los conocimientos formados en clases durante estos años.

BIBLIOGRAFÍA

Manual PCS Compact Workstation, edición 04/2005. [PDF] [Consulta: Agosto/2019 - septiembre/2019].

Manual SIMATIC S7-1200 S7-1500 Regulación PID, edición 10/2018 [PDF] [Consulta: Septiembre/2019 – Noviembre/2019].

CÁCERES Navarro, Alejandro Gabriel. Control multivariable e inalámbrico de la estación de trabajo compacta FESTO. Memoria (Ingeniería de ejecución en Control e Instrumentación Industrial) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2017. 140 h.

MUÑOZ Pardo, Sebastián Andrés. Implementación de estrategias de control para la regulación de la plataforma FESTO. Memoria (Ingeniería de ejecución en Control e Instrumentación Industrial) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2018. 55 h.

MONTENEGRO Zamora, Guelis. Parte 1: Sistema de control de nivel de un estanque: ¿Sistema lineal o no lineal? [Videgrabación]. Chile, YouTube, [2019]. 9:34min, sonido y video.

MONTENEGRO Zamora, Guelis. Parte 2: Sistema de control de nivel de un estanque: Función de transferencia en un punto de operación [Videgrabación]. Chile, YouTube, [2019]. 21:44min, sonido y video.

MONTENEGRO Zamora, Guelis. Parte 3: Sistema de control de nivel de un estanque: Control del sistema no lineal y del modelo lineal [Videgrabación]. Chile, YouTube, [2019]. 23:22min, sonido y video.

MONTENEGRO Zamora, Guelis.: Características de respuesta de los sistemas [diapositiva]. Viña del Mar, Chile. Asignatura de Control de Procesos, Universidad Técnica Federico Santa María. 2019. 44 diapositivas, col.

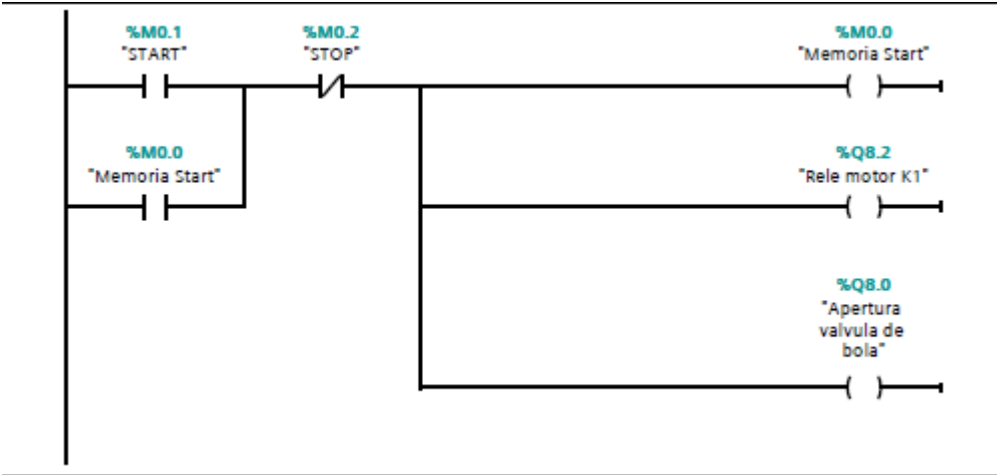
MONTENEGRO Zamora, Guelis.: Tipos de Controladores [diapositiva]. Viña del Mar, Chile. Asignatura de Control de Procesos, Universidad Técnica Federico Santa María. 2019. 32 diapositivas, col.

MONTENEGRO Zamora, Guelis.: Principios de Sintonización de Controladores PID [diapositiva]. Viña del Mar, Chile. Asignatura de Control de Procesos, Universidad Técnica Federico Santa María. 2019. 80 diapositivas, col.

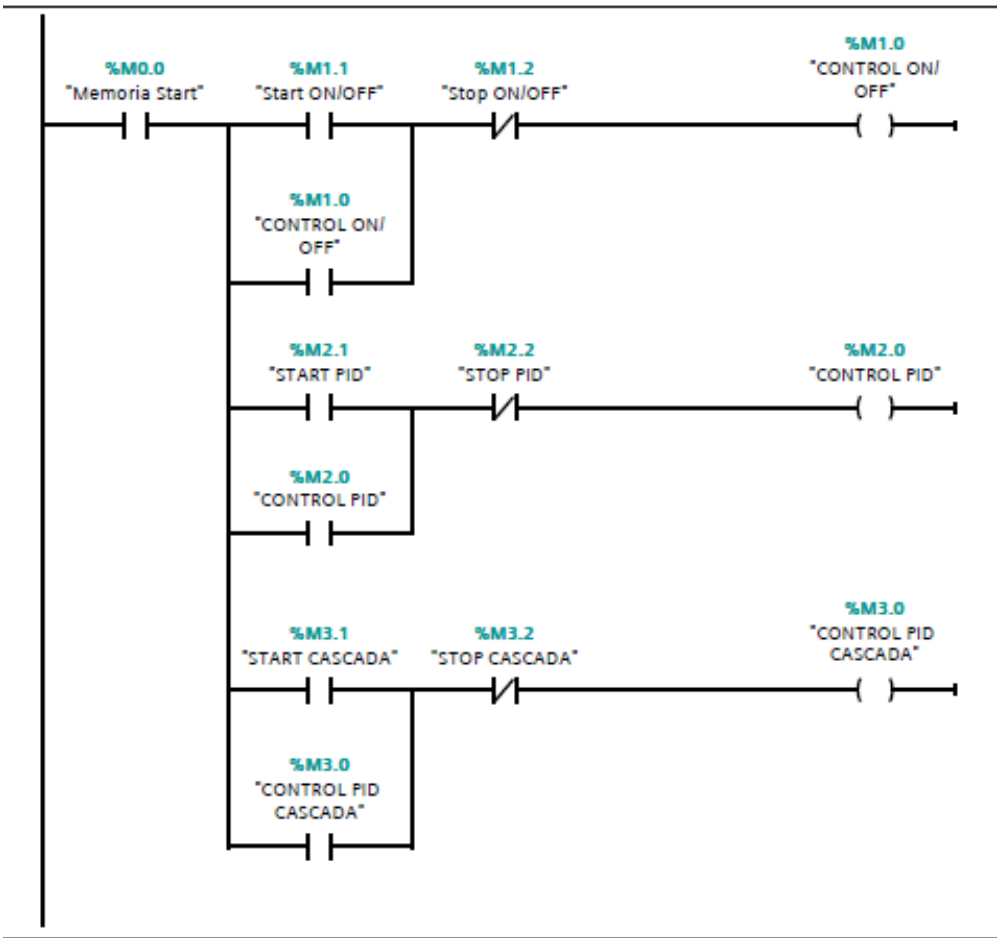
ANEXO A: PROGRAMACIÓN CPU S7-1516 EN LENGUAJE KOP

- Segmentos de MAIN (OB0)

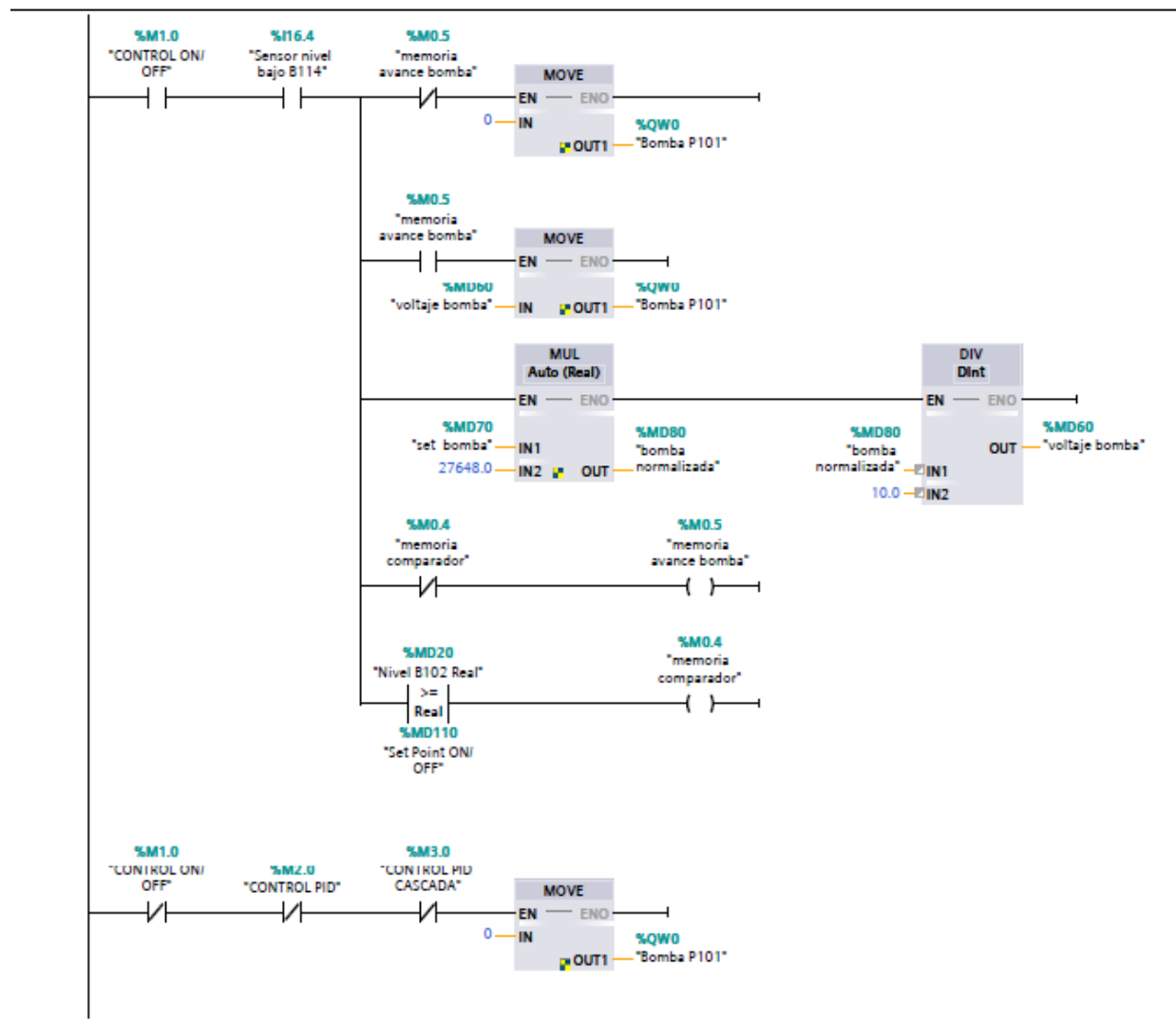
Segmento 1: Activación de relés y apertura de válvula de bola.



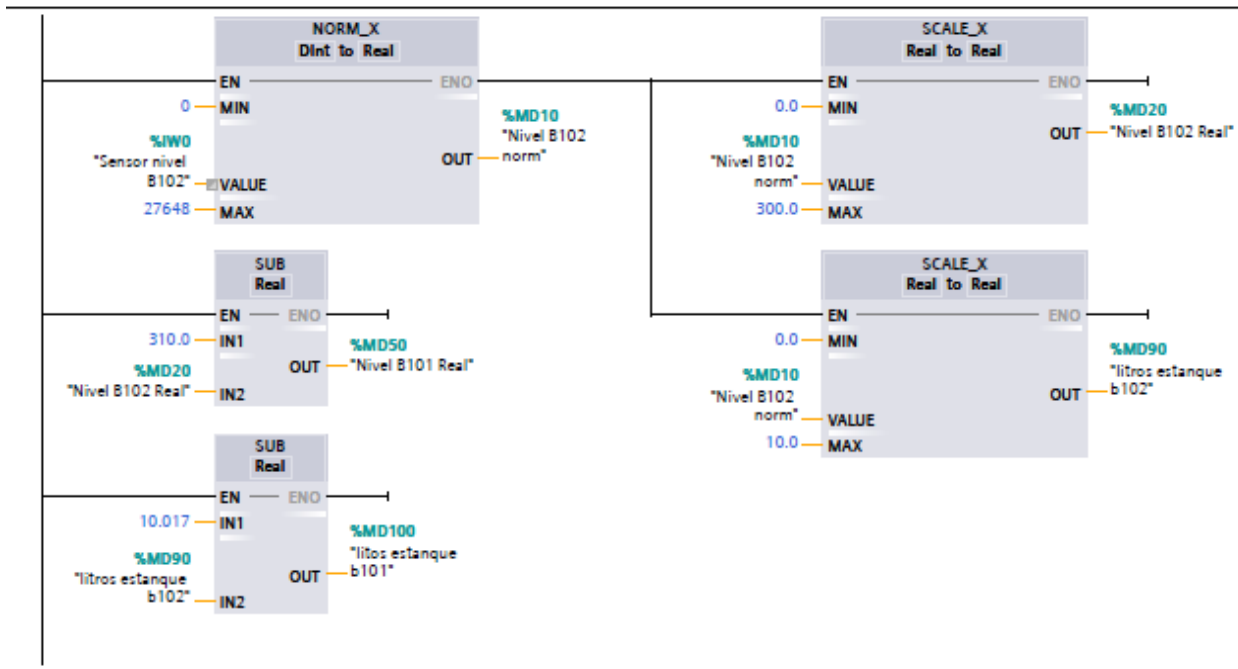
Segmento 2: Selección de control.



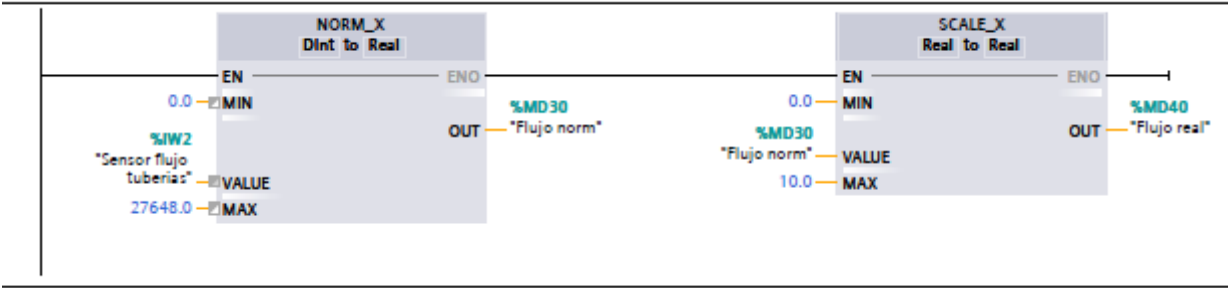
Segmento 3: control ON/OFF.



Segmento 4: Medición de sensor de nivel para estanques B101 y B102.

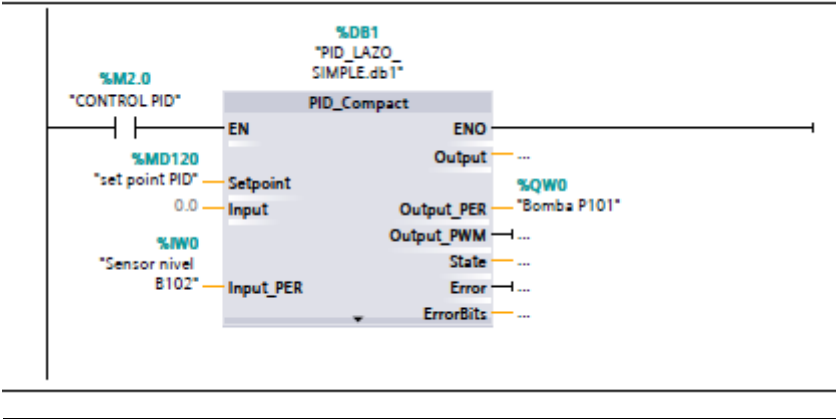


Segmento 5: Medición de Flujo.

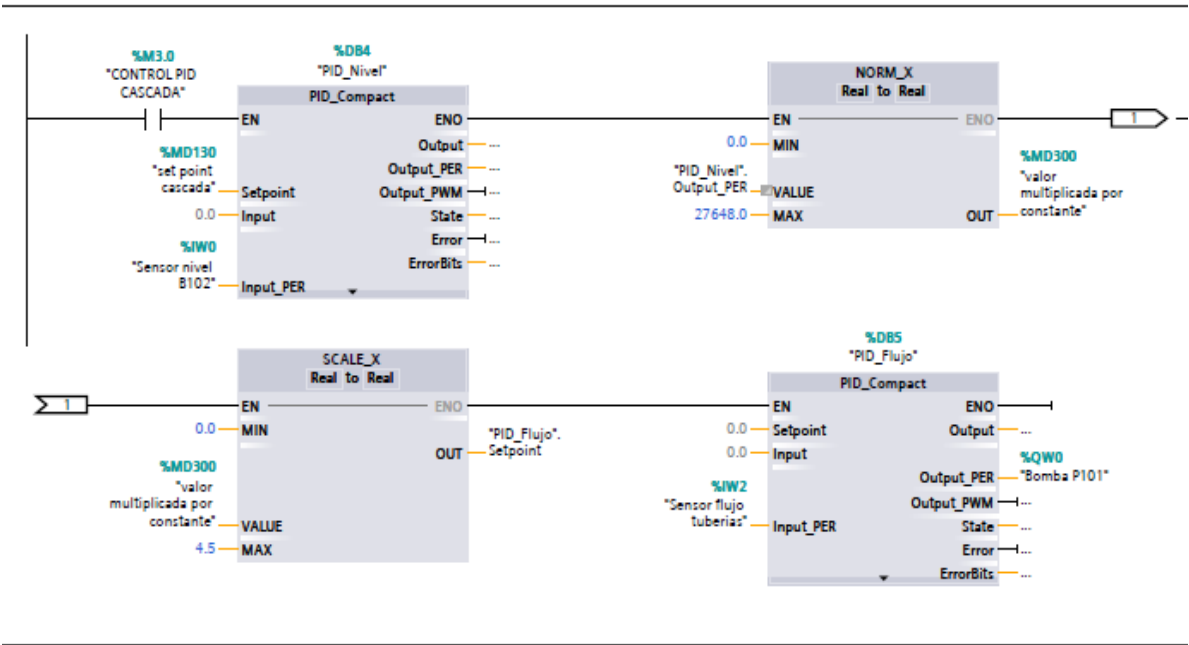


- Segmentos de Cyclic Interrupt(OB30)

Segmento 1: control PI en lazo cerrado simple.



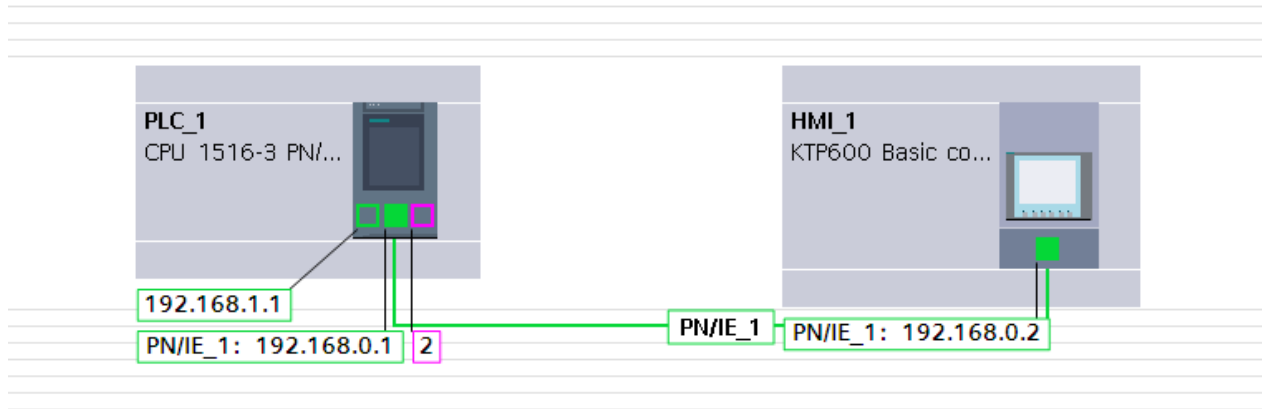
Segmento 2: control PI con esquema de control en cascada.



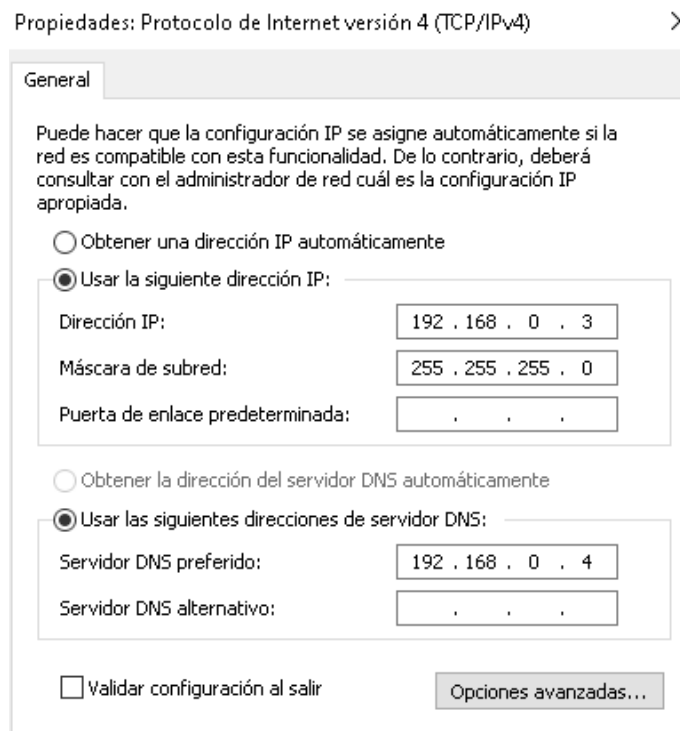
- Variables dentro de CPU de PLC:

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en HMI Engineering
	Botonera start	Bool	%I7.0	False	True	True	True
	Botonera stop	Bool	%I7.1	False	True	True	True
	Bomba P101	Word	%QW0	False	True	True	True
	Sensor nivel B102	Word	%IW0	False	True	True	True
	Sensor flujo tuberías	Word	%IW2	False	True	True	True
	Rele motor K1	Bool	%Q8.2	False	True	True	True
	Set Point ON/OFF	Real	%MD110	False	True	True	True
	Memoria Start	Bool	%M0.0	False	True	True	True
	Sensor nivel bajo B114	Bool	%I6.4	False	True	True	True
	Sensor nivel Alto B113	Bool	%I6.3	False	True	True	True
	Nivel B102 norm	Real	%MD10	False	True	True	True
	Nivel B102 Real	Real	%MD20	False	True	True	True
	Flujo norm	Real	%MD30	False	True	True	True
	Flujo real	Real	%MD40	False	True	True	True
	Nivel B101 Real	Real	%MD50	False	True	True	True
	START	Bool	%M0.1	False	True	True	True
	STOP	Bool	%M0.2	False	True	True	True
	voltaje bomba	DWord	%MD60	False	True	True	True
	set bomba	Real	%MD70	False	True	True	True
	bomba normalizada	Real	%MD80	False	True	True	True
	Valvula Proporcional	Word	%QW2	False	True	True	True
	bomba binaria	Bool	%Q8.3	False	True	True	True
	memoria comparador	Bool	%M0.4	False	True	True	True
	memoria avance bomba	Bool	%M0.5	False	True	True	True
	Apertura valvula de bola	Bool	%Q8.0	False	True	True	True
	apertura valvula bola	Bool	%M0.6	False	True	True	True
	litros estanque b102	Real	%MD90	False	True	True	True
	litros estanque b101	Real	%MD100	False	True	True	True
	CONTROL ON/OFF	Bool	%M1.0	False	True	True	True
	CONTROL PID	Bool	%M2.0	False	True	True	True
	CONTROL PID CASCADA	Bool	%M3.0	False	True	True	True
	Start ON/OFF	Bool	%M1.1	False	True	True	True
	Stop ON/OFF	Bool	%M1.2	False	True	True	True
	START PID	Bool	%M2.1	False	True	True	True
	STOP PID	Bool	%M2.2	False	True	True	True
	START CASCADA	Bool	%M3.1	False	True	True	True
	STOP CASCADA	Bool	%M3.2	False	True	True	True
	set point PID	Real	%MD120	False	True	True	True
	set point cascada	Real	%MD130	False	True	True	True
	Tag_1	DWord	%MD200	False	True	True	True
	memoria start on/off	Bool	%M0.3	False	True	True	True
	memoria stop on/off	Bool	%M0.7	False	True	True	True
	memoria avance on/off	Bool	%M1.3	False	True	True	True
	valor multiplicada por constante	DWord	%MD300	False	True	True	True
	Tag_2	DWord	%MD305	False	True	True	True

ANEXO B: CONFIGURACIÓN DE RED PARA CONEXIÓN CON COMPUTADOR



- Se asignan datos de red dentro del Siemens S7-1500 1516-3 PN/DP
Ip: 192.168.0.1
Mascara de Subred: 255.255.255.0
- Se asigna igualmente datos de red a interfaz HMI KTP600
Ip: 192.168.0.2



- Se asigna igualmente datos de red a Protocolo TCP/IPV4 de la red ETHERNET del computador
Ip: 192.168.0.3
Mascara de Subred: 255.255.255.0
DNS: 192.168.0.4