



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA CON CONTROL
PROPORCIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVO PARA CAUDAL MEDIANTE UN
SERVIDOR, PLC Y SOFTWARE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN -
FACULTAD DE MECÁNICA”**

BALAREZO BAUTISTA FERNANDO JAVIER
GUANO QUILLE DENY PATRICIO

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROPUESTA TECNOLÓGICA

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA – ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2017-12-20

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

FERNANDO JAVIER BALAREZO BAUTISTA

Titulado:

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA CON CONTROL
PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO PARA CAUDAL MEDIANTE UN
SERVIDOR, PLC Y SOFTWARE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN-
FACUTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con ésta recomendación:

Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo
DIRECTOR

Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa
MIEMBRO

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

2017-12-20

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

DENY PATRICIO GUANO QUILLE

Titulado:

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA CON CONTROL
PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO PARA CAUDAL MEDIANTE UN
SERVIDOR, PLC Y SOFTWARE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN-
FACULTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con ésta recomendación:

Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo
DIRECTOR

Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa
MIEMBRO

EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: FERNANDO JAVIER BALAREZO BAUTISTA

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA CON CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO PARA CAUDAL MEDIANTE UN SERVIDOR, PLC Y SOFTWARE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN-FACULTAD DE MECÁNICA”

Fecha de Examinación: 2018-07-19

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Dr. Marco Haro Medina PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo DIRECTOR			
Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Dr. Marco Haro Medina
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: DENY PATRICIO GUANO QUILLE

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA CON CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO PARA CAUDAL MEDIANTE UN SERVIDOR, PLC Y SOFTWARE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN-FACULTAD DE MECÁNICA”

Fecha de Examinación: 2018-07-19

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Dr. Marco Haro Medina PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo DIRECTOR			
Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES:

El presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Haro Medina

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El presente trabajo de titulación que presentamos es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Fernando Javier Balarezo Bautista

Deny Patricio Guano Quille

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Balarezo Bautista Fernando Javier y Guano Quille Deny Patricio, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos contantes en el documento que provienen de otra fuente, están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

Fernando Javier Balarezo Bautista

Cédula de Identidad: 050348467-7

Deny Patricio Guano Quille

Cédula de Identidad: 020228170-5

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación está dedicado a mi madre Blanca Bautista quien, con su apoyo incondicional brindado hasta el final de mi carrera, por ser un ejemplo de superación y lucha constante ante las adversidades sobre todas las cosas siempre brindándome su apoyo para lograr este éxito y ser una persona de bien.

A mi abuelita Nérida Gavilánez que siempre han sido un ejemplo a seguir inculcándome buenos valores y con sus consejos siempre llenan mis días de felicidad.

A mis tías, tíos, primas, primos y amigos por su apoyo brindado en todo momento, a veces una palabra de aliento ha sido suficiente motivación para seguir luchando cada día por esta meta tan anhelada.

Fernando Javier Balarezo Bautista

Este proyecto de titulación está dedicado primeramente a Dios, a mi Familia en especial a mis padres: Fausto Efraín GUANO y María Magdalena Quille por su apoyo incondicional brindado hasta el final de mi carrera y por a ver hecho de mí una persona de bien.

A mis hermanos que siempre han sido un ejemplo a seguir inculcándome buenos valores, a mis tíos, primos, amigos y compañeros quienes nunca me dejaron solo y siempre me brindaron la mano para cumplir esta meta.

A ellos este proyecto, que sin ellos no hubiese podido ser.

Deny Patricio Guano Quille

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento y a cada uno de sus docentes, por compartir sus conocimientos y aportar en mi formación como persona y como profesional.

A mi madre y toda mi familia, mis amigos y demás personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito otra etapa de mi vida.

Y sobre todo un agradecimiento muy especial a mi madre porque siempre creyó en mí y ha estado a mi lado en todo momento sin dejarme decaer en esta lucha constante.

FERNADO JAVIER BALAREZO BAUTISTA

Agradezco a Dios por bendecirme y permitir llegar a donde he llegado, a mis padres que siempre me brindaron su apoyo moral y económico para salir adelante.

A mi familia, amigos y demás personas que apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito otra etapa de mi vida. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por darme la oportunidad de estudiar y llegar a ser un profesional.

DENY PATRICIO GUANO QUILLE

CONTENIDO

Pág.

CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos.</i>	3

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Automatización	4
2.1.1	<i>Niveles de automatización</i>	4
2.1.1.1	<i>Nivel de acción/sensado.</i>	4
2.1.1.2	<i>Nivel de control.</i>	5
2.1.1.3	<i>Nivel de supervisión.</i>	5
2.1.1.4	<i>Nivel de gestión.</i>	5
2.1.2	Clases de automatización industrial.	5
2.1.2.1	<i>Automatización fija.</i>	5
2.1.2.2	<i>Automatización programable.</i>	5
2.1.2.3	<i>Automatización flexible.</i>	5
2.1.2.4	<i>Automatización integrada.</i>	5
2.2	Redes de comunicación industrial	6
2.2.1	Clasificación de las redes de comunicación industrial	6
2.2.1.1	<i>Redes de datos.</i>	6
2.2.1.2	<i>Redes de empresa y de fábrica.</i>	6
2.2.1.3	<i>Redes de célula.</i>	6
2.2.1.4	<i>Redes de control.</i>	6
2.2.1.5	<i>Redes de controladores.</i>	7
2.2.1.6	<i>Redes de sensores – actuadores.</i>	7
2.3	Controlador lógico programable (PLC)	7
2.3.1	Estructura del PLC	7
2.3.1.1	<i>CPU.</i>	7

2.3.1.2	<i>Procesador</i>	7
2.3.1.3	<i>Memoria</i>	8
2.3.2	<i>Interfaces de entradas y salidas</i>	8
2.3.2.1	<i>Sección de entradas (I)</i>	8
2.3.2.2	<i>Sección de salidas (Q)</i>	8
2.3.3	<i>Lenguaje de programación de un PLC</i>	8
2.3.3.1	<i>Lenguaje de contactos (KOP)</i>	8
2.3.3.2	<i>Lenguaje de funciones (FUP)</i>	9
2.4	PLC SIMATIC S7-1200	9
2.4.1	<i>Características principales del SIMATIC S7 - 1200</i>	10
2.4.1.1	<i>Signal board (SB)</i>	10
2.4.1.2	<i>Módulos de señales (SM)</i>	10
2.4.1.3	<i>Módulos de comunicación (CM)</i>	11
2.5	Pantallas HMI	11
2.5.1	<i>Software HMI</i>	11
2.6	TIA PORTAL V13	11
2.6.1	<i>Las tareas de automatización más común contienen lo siguiente</i>	12
2.6.2	<i>Ventajas del TIA portal</i>	12
2.6.3	<i>Vistas del TIA portal</i>	12
2.6.3.1	<i>Vista del portal</i>	12
2.6.3.2	<i>Vista del proyecto</i>	12
2.7	Control PID	12
2.7.1	<i>Funcionamiento</i>	13
2.7.2	<i>Acción de control proporcional (P)</i>	13
2.7.3	<i>Acción de control integral (I)</i>	14
2.7.4	<i>Acción de control derivativo (D)</i>	15
2.7.5	<i>Acción de control proporcional – integral – derivativo (PID)</i>	16
2.8	NI OPC server	17
2.8.1	<i>Ventajas del OPC server</i>	17
2.9	Software LabVIEW	17
2.10	Software MATLAB	18
2.11	SCADA	18
2.11.1	<i>Características del SCADA</i>	19
2.11.2	<i>Funciones del SCADA</i>	19
2.11.3	<i>Componentes del sistema SCADA</i>	20
2.11.3.1	<i>Estación maestra</i>	20
2.11.3.2	<i>Unidad terminal remota (RTU)</i>	20

2.11.3.3	<i>Infraestructura y métodos de comunicación.</i>	20
2.11.4	<i>Requisitos básicos para la elaboración de un sistema SCADA</i>	20
2.12	Medidores de caudal	20
2.12.1	<i>Clasificación de los medidores de caudal</i>	20
2.12.1.1	<i>Tubo pitot.</i>	20
2.12.1.2	<i>Medidor de codo.</i>	21
2.12.1.3	<i>Medidor de placa.</i>	21
2.12.1.4	<i>Medidor magnético.</i>	21
2.13	Elementos de control	22
2.13.1	<i>Tipos de válvulas</i>	22
2.13.1.1	<i>Válvula de globo</i>	22
2.13.1.2	<i>Válvula de compuerta.</i>	22
2.13.1.3	<i>Válvula de mariposa.</i>	23
2.13.1.4	<i>Válvula de macho.</i>	23
2.14	Sistemas de bombeo	24
2.14.1	<i>Tipos de sistemas de bombeo.</i>	24
2.14.2	<i>Nomenclatura típica de una instalación de bombeo.</i>	24
2.14.2.1	<i>Lado de succión</i>	25
2.14.2.2	<i>Lado de impulsión.</i>	25
2.14.3	<i>Clasificación de las bombas.</i>	25
2.14.3.1	<i>Desplazamiento positivo.</i>	25
2.14.3.2	<i>Desplazamiento no positivo o rotodinámico.</i>	25

CAPÍTULO III

3.	CONSTRUCCIÓN, SELECCIÓN Y MONTAJE DE EQUIPOS, DISPOSITIVOS Y MATERIALES	26
3.1	CONSTRUCCIÓN	26
3.1.1	<i>Construcción del módulo.</i>	26
3.2	Selección	27
3.2.1	<i>Selección de equipos</i>	27
3.2.1.1	<i>Motobomba centrífuga.</i>	27
3.2.1.2	<i>Variador de frecuencia.</i>	27
3.2.1.3	<i>Controlador lógico programable (PLC) SIMATIC S7 - 1200</i>	28
3.2.1.4	<i>Signal board SB 1232.</i>	29
3.2.1.5	<i>Pantalla HMI.</i>	30
3.2.2	<i>Selección de dispositivos.</i>	31

3.2.2.1	<i>Breaker</i>	31
3.2.2.2	<i>Sensor ultrasónico</i>	32
3.2.2.3	<i>Sensor de flujo (caudalímetro)</i>	32
3.2.2.4	<i>Sensor de presión</i>	33
3.2.3	<i>Selección de materiales</i>	34
3.2.3.1	<i>Tubería y accesorios</i>	34
3.2.3.2	<i>Cable de red</i>	35
3.2.3.3	<i>Riel DIN</i>	35
3.3	Montaje	36
3.3.1	<i>Montaje del breaker</i>	36
3.3.2	<i>Montaje del variado de frecuencia</i>	36
3.3.3	<i>Montaje de los tanques y las líneas de distribución</i>	37
3.3.4	<i>Montaje de la bomba centrífuga</i>	37
3.3.5	<i>Montaje del caudalímetro</i>	38
3.3.6	<i>Montaje del PLC y HMI</i>	38

CAPÍTULO IV

4.	PROGRAMACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL PID PARA CAUDAL DE AGUA Y EL SCADA	40
4.1	Configuración del sistema en TIA portal V13	40
4.1.1	<i>Creación del proyecto</i>	40
4.1.2	<i>Selección de equipos</i>	41
4.1.3	<i>Dispositivos añadidos</i>	43
4.1.3.1	<i>Signal board SB 1232</i>	43
4.1.4	<i>Interfaz PROFINET</i>	44
4.1.5	<i>Programación del equipo PLC S7-1200</i>	45
4.1.5.1	<i>Segmento 1</i>	45
4.1.5.2	<i>Segmento 2</i>	46
4.1.5.3	<i>Segmento 3</i>	47
4.1.6	<i>Programación de la pantalla HMI</i>	47
4.2	Conexión entre LabVIEW y PLC utilizando NI-OPC server	48
4.2.1	<i>Creación del NI OPC server</i>	48
4.2.2	<i>Seleccionar el dispositivo PLC</i>	49
4.2.3	<i>Creación de memorias de interfaz para la comunicación entre LabVIEW y PLC</i>	49
4.3	Programación del sistema en LabVIEW	51
4.3.1	<i>Configuración del sistema de adquisición de datos</i>	51

4.4	Modelado del sistema de control de caudal (Herramienta Ident de Matlab).....	55
4.5	Implementación del controlador PID.....	63
4.6	Análisis de los diferentes tipos de controladores P, PI, PD, PID.	65
4.6.1	<i>Control Proporcional (P)</i>	66
4.6.2	<i>Control proporcional-integral (PI)</i>	66
4.6.3	<i>Control Proporcional-Derivativo (PD)</i>	67
4.6.4	<i>Comportamiento de los diferentes controladores</i>	67
4.7	Pruebas de funcionamiento del sistema de control de caudal.....	68
4.7.1	<i>Pruebas realizadas con simulink/Matlab</i>	68
4.7.2	<i>Pruebas realizadas con el módulo de control de caudal</i>	69

CAPÍTULO V

5.	MANUAL DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS.....	73
5.1	Plan de seguridad de los equipos que conforman el módulo de control de caudal de agua.....	73
5.2	Plan de mantenimiento de los equipos que conforman el módulo de control de caudal.....	73
5.2.1	<i>Sistema de codificación</i>	73
5.2.2	<i>Banco de tareas</i>	74
5.2.3	<i>Agenda de actividades de mantenimiento</i>	75
5.2.4	<i>Plan de mantenimiento de los equipos</i>	75

CAPÍTULO VI

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
6.1	Conclusiones.....	76
6.2	Recomendaciones.....	77

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-3. Características motobomba centrífuga.....	27
Tabla 2-3. Características del variador de frecuencia.	28
Tabla 3-3. Características del PLC S7 - 1200	29
Tabla 4-3. Características signal board	30
Tabla 5-3. Características pantalla HMI.....	30
Tabla 6-3. Características del breaker	31
Tabla 7-3. Características sensor ultrasónico	32
Tabla 8-3. Características del sensor de flujo (caudalímetro)	33
Tabla 9-3. Características sensor de presión	33
Tabla 10-3. Tuberías y accesorios.....	34
Tabla 1-5. Codificación de equipos.....	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-2 Niveles de automatización	4
Figura 2-2 Componentes del PLC, diagrama de bloques	7
Figura 3-2 Lenguaje KOP.....	9
Figura 4-2 Lenguaje FUP	9
Figura 5-2 PLC S7-1200.....	10
Figura 6-2 Tia portal.....	11
Figura 7-2 Esquema del control PID	13
Figura 8-2 Control proporcional (P).....	14
Figura 9-2 Control integral (I)	15
Figura 10-2 Control derivativo (D).....	16
Figura 11-2 Software matlab	18
Figura 12-2 Proceso SCADA	19
Figura 13-2 Medidor tubo pitot	21
Figura 14-2 Medidor de placa.....	21
Figura 15-2 Medidor magnético	22
Figura 16-2 Válvula de globo	22
Figura 17-2 Válvula de compuerta	23
Figura 18-2 Válvula de mariposa	23
Figura 19-2 Válvula de macho	24
Figura 20-2 Nomenclatura de bombeo	25
Figura 1-3 Módulo didáctico para control de caudal de agua.....	26
Figura 2-3 Motobomba centrífuga.....	27
Figura 3-3 Variador de frecuencia.....	28
Figura 4-3 PLC simatic s7 - 1200.....	29
Figura 5-3 Signal board	30
Figura 6-3 Pantalla HMI KTP 600	31
Figura 7-3 Breaker.....	32
Figura 8-3 Sensor ultrasónico.....	32
Figura 9-3 Sensor de flujo (caudalímetro).....	33
Figura 10-3 Sensor de presión	34
Figura 11-3 Cable de red	35
Figura 12-3 Riel din.....	35
Figura 13-3 Breaker.....	36
Figura 14-3 Variador de frecuencia.....	37

Figura 15-3	Tanques de succión y descarga	37
Figura 16-3	Motobomba centrífuga.....	38
Figura 17-3	Caudalímetro YF-S201	38
Figura 18-3	Pantalla HMI, PLC-1200	39
Figura 1-4	Pantalla de inicio del tia portal.....	40
Figura 2-4	Creación del nuevo proyecto	41
Figura 3-4	Pantalla de primeros pasos.....	41
Figura 4-4	Agregación de nuevo dispositivo.....	42
Figura 5-4	Pantalla del dispositivo agregado.....	42
Figura 6-4	Detección del hardware para el PLC.....	43
Figura 7-4	Añadir nuevo dispositivo	43
Figura 8-4	Agregar signal boards	44
Figura 9-4	Enlace entre PLC y el HMI vía profinet	45
Figura 10-4	Programacion segmento 1	46
Figura 11-4	Programación segmento 2.....	46
Figura 12-4	Programación segmento 3.....	47
Figura 13-4	Pantalla de presentación HMI.....	47
Figura 14-4	Pantalla del proceso	48
Figura 15-4	Selección del adaptador	48
Figura 16-4	Selección del PLC en NI OPC.....	49
Figura 17-4	Configuración de la dirección del dispositivo.....	49
Figura 18-4	Creación de los tags	50
Figura 19-4	Listado de tags en NI OPC.....	50
Figura 20-4	Verificación del estado del quick client.....	51
Figura 21-4	DAQ assistant 6009	51
Figura 22-4	Bloque de adquisición de datos dDAQ de LabVIEW.....	51
Figura 23-4	Configuración del dato para la adquisición DAQ assistant.	52
Figura 24-4	Selección de la entrada del contador.....	52
Figura 25-4	Configuración del canal rango de operación.....	53
Figura 26-4	Bloque de programas en LabVIEW	53
Figura 27-4	Bloque de programas LabVIEW	54
Figura 28-4	Configuración de la formula	55
Figura 29-4	Sistema de identificación Matlab.....	55
Figura 30-4	Sistema de identificación Matlab.....	56
Figura 31-4	Formato de datos para señales en el dominio de tiempo.....	57
Figura 32-4	Herramienta de identificación (Ident de Matlab).....	58
Figura 33-4	Modelo del proceso.....	59

Figura 34-4	Selección del número de polos y ceros para la función de transferencia del sistema.	59
Figura 35-4	Generación de los modelos del sistema en Ident de Matlab.	60
Figura 36-4	Cuervas y porcentaje de estimación de la función de transferencia.....	60
Figura 37-4	Curva y porcentaje de estimación de la función de transferencia.....	61
Figura 38-4	Resultado del modelo identificado en Ident de Matlab.....	61
Figura 39-4	Diseño del sistema en simulink de Matlab.....	62
Figura 40-4	Simulink de Matlab.....	62
Figura 41-4	Diseño en simulink del controlador PID.....	63
Figura 42-4	PID Tuner	63
Figura 43-4	Valores de ganancias.....	63
Figura 44-4	Estructura del PID en LabVIEW	64
Figura 45-4	Bloque de programación PID de LabVIEW.	64
Figura 46-4	Panel frontal LabVIEW	65
Figura 47-4	Simulink de Matlab control P	66
Figura 48-4	Simulink de Matlab control PI.....	66
Figura 49-4	Control PD simulink de Matlab	67
Figura 50-4	Simulink de Matlab.....	67
Figura 51-4	Comportamiento del sistema simulink/Matlab	69
Figura 52-4	Comportamiento del controlador P	69
Figura 53-4	Comportamiento del controlador PI.....	70
Figura 54-4	Comportamiento del controlador PD	70
Figura 55-4	Comportamiento del controlador PID.....	71
Figura 56-4	Comportamiento del controlador PID a perturbaciones.....	71
Figura 57-4	Pantalla HMI.....	72
Figura 1-5	Codificación de equipos.....	74

LISTA DE ABREVIACIONES

SCADA	Supervisión Control y Adquisición de Datos
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLC	Controlador Lógico Programable
HMI	Interfaz Hombre-Máquina
CPU	Unidad Central de Procesamiento
CAD	Diseño Asistido por Computadora
CAE	Ingeniería Asistida por Computadora
CAM	Fabricación Asistida por Computadora
CIM	Fabricación Integrado por Computadora
ROM	Memoria de sólo lectura
I	Entradas digitales
Q	Salidas digitales
E/S	Entradas y Salidas
SB	Signal Board (Placa de Señales)
SM	Módulo de Señales
CM	Módulo de Comunicación
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
RTU	Unidad Térmica Remota

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A** Adquisición de datos del sistema
- Anexo B** Obtención de los datos y parametrización
- Anexo C** Programación para la validación del sistema
- Anexo D** Programación para la pantalla HMI en LabVIEW
- Anexo E** Visualización de las variables físicas en LabVIEW
- Anexo F** Construcción del diagrama de bloques en simulink/Matlab
- Anexo G** Técnicas de seguridad del módulo de control de caudal
- Anexo H** Banco de tareas
- Anexo I** Agenda de actividades de mantenimiento
- Anexo J** Plan de mantenimiento

RESUMEN

Se realizó el diseño e implementación de un módulo de control Proporcional, Integral y Derivativo de un sistema de caudal para equipar el Laboratorio de Automatización y realizar prácticas de control (P, PI, PD y PID). Para la implementación del módulo didáctico utilizamos los siguientes componentes, una bomba de agua como fuente de alimentación, dos reservorios de agua, un caudalímetro, sensor ultrasónico, PLC S7-1200, un variador de frecuencia que ayuda a regular la velocidad de la bomba, una válvula de globo que permita simular interrupciones del paso de caudal y una DAQ USB 6009 para la recopilación de datos mediante un programa realizado en LabVIEW. Se programó cada uno de los controladores e indicadores que conforman el módulo de control PID con el software TIA PORTAL V13, así como un sistema SCADA para el control y monitoreo de la planta utilizando un HMI y el software LabVIEW con la ayuda de un servidor OPC. Posteriormente se realizó la adquisición de datos del sistema de caudal, luego la información fue llevado al Software MATLAB que determinó la función de transferencia de la planta obteniendo el modelo identificado, utilizando las herramientas de simulación y sintonía del PID Tuner/Matlab encontramos las ganancias del controlador, mediante las herramientas de simulink/Matlab se diseñó, análisis y comparo los controladores P, PI, PD y PID realizando distintas graficas de desempeño para observar las características de cada uno de los controladores, ingresamos las ganancias obtenidas al programa realizado en LabVIEW cumpliendo las expectativas de simulación en relación al control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), cuyo objetivo es entregar una respuesta siempre acorde a lo que necesita. Se recomendó que las ganancias del PID deben ser ingresados en base a los resultados deseados, es decir, poner los valores, verificar los resultados obtenidos e ir modificando para mejorar las curvas.

Palabras clave: <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <MANTENIMIENTO>, <PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO>, <ADQUISICIÓN DE DATOS>, <SUPERVISIÓN, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS (SCADA)>, <TIA PORTAL V13 (SOFTWARE)>, <LABVIEW (SOFTWARE)>, <MATLAB (SOFTWARE)>.

ABSTRACT

The design and implementation of a Proportional, Integral and Derivative control module of a flow system for the Automation Laboratory and perform control practices (P, PI, PD and PID) was performed. For the implementation of the didactic module we use the following components, a water pump as a power source, two water reservoirs, a flow meter, ultrasonic sensor, PLC S7-1200, a frequency converter that helps regulate the speed of the pump, a globe valve that allows to simulate flow rate interruptions and a USB 6009 DAQ for data collection through a program made in LabVIEW. Each one of the controllers and indicators that make up the PID control module was programmed with the TIA PORTAL V13 software, as well as a SCADA system for the control and monitoring of the plant using an HMI and LabVIEW software with the help of an OPC server. Later, the data acquisition of the flow system was carried out, then the information was taken to the MATLAB Software that determined the transfer function of the plant obtaining the identified model, using the simulation and tuning tools of the PID Tuner/Matlab we found the gains of the controller, using the Simulink/Matlab tools was designed, analyzed and compared the P, PI, PD and PID controllers: performing different presentation graphs to observe the characteristics of each of the controllers, we enter the gains obtained to the program made in LabVIEW fulfilling the expectations of simulation in relation to Proportional-Integral-Derivative (PID) control, whose objective is to deliver an always answer according to what you need. It was recommended that the PID gains should be entered based on the desired results, that is, placed the values, verify the results obtained and modify them to improve the curves.

KEYWORDS: <TECHNOLOGIES AND SCIENCES OF ENGINEERING>, <MAINTENANCE>, <PROPOCIONAL - COMPREHENSIVE - DERIVATIVE>, <ACQUISITION OF DATA (SCADA)>, <TIA PORTAL V13 (SOFTWARE)>, <LABVIEW (SOFTWARE)>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Toda empresa industrial con el paso de los años se vuelve más exigente en el área de la automatización, por esta razón que para poder competir y adaptarse a las exigencias del mercado se ha visto la necesidad de ir actualizando, simplificando y modernizando sus sistemas, implementando equipos y herramientas de control de última generación de manera que se pueda incrementar la velocidad de producción y la confiabilidad de los equipos sean mayores.

La escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH cuenta con un laboratorio de automatización industrial donde se dispone de varios módulos EPC (Entrenador de Planta de Control) de manera que será muy útil para los estudiantes en la realización de sus prácticas de Laboratorio. Debido al avance tecnológico de los procesos industriales nos encontramos con la necesidad de utilizar equipos de monitoreo y medición con la finalidad de mejorar destrezas y habilidades en el campo de la automatización industrial.

En la Facultad de Mecánica se han realizado tesis en relación con el control de variables físicas como presión, temperatura y nivel en este caso estudiaremos un sistema de control PID para caudal que procurará presentar una solución a las instituciones y a la industria la posibilidad de entrenamiento y capacitación para estudiantes y profesionales.

1.2 Justificación

Las industrias utilizan algunos sistemas de control como son: presión, caudal, fuerza, velocidad, temperatura, entre otras, estos procesos se los puede observar actualmente en empresas de lácteos, agua potable, petroleras, etc., que tienen diversos sistemas de control manual y automático; algunos de estos sistemas pueden tener problemas en el comportamiento de sus variables físicas como por ejemplo: en los sistemas de caudal que tienen controladores on-off se generan golpes de ariete en las válvulas que van a ir deteriorando el sistema o a su vez si el caudal es controlado por bombas de agua, el encendido y apagado de los motores generan picos de corriente que disminuyen la vida útil de los elementos.

Al disponer de un control Proporcional – Integral – Derivativo (PID) se puede controlar el valor de caudal, cuando en el sistema se produzca una variación de caudal teniendo en consideración el valor seteado por el operador, el PLC enviara una señal al variador de velocidad para que aumente o disminuya la velocidad de la bomba, y de esta manera varíe el caudal de agua hasta alcanzar el valor establecido.

Se debe mencionar que la implementación de este sistema de control se realizará con elementos tecnológicos que pueda simular procesos industriales.

Es por ello que el presente trabajo busca como finalidad, el construir un módulo con control PID para el caudal de agua, de esta manera poder controlar y mantener el caudal de forma automático, para ello se va a colocar sensores de caudal que envíen señales al Controlador Lógico Programable (PLC) posteriormente al software de adquisición de datos, una pantalla Interfaz Hombre-Máquina (HMI) que ayude a monitorear el caudal dentro del proceso y un servidor OPC (OLE for Process Control) que controle y supervise el sistema, con el propósito que los estudiantes de la carrera de Ingeniería de Mantenimiento aprendan y experimenten con sistemas que usualmente se utilizan en las industrias.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.*

Diseñar e implementar un sistema SCADA con control Proporcional – Integral - Derivativo para caudal mediante un servidor, PLC y software en el Laboratorio de Automatización - Facultad de Mecánica.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Diseñar el prototipo para el monitoreo del sistema de control de caudal de agua.

Instalar en el prototipo los sensores de caudal, Bomba, PLC, HMI, para el control y monitoreo.

Desarrollar un esquema eléctrico que permita enviar y recibir señales de los sensores para el monitoreo y control de todo el sistema didáctico con la utilización del software TIA PORTAL V13 y LabVIEW.

Sacar la función de transferencia mediante métodos empíricos y obtener la ecuación que representa al sistema de menor grado.

Realizar el análisis de los controladores P, PI, PD, PID, para encontrar los parámetros que mejor se ajustan para la estabilidad del sistema mediante el software MATLAB®.

Realizar un control PID en LabVIEW® y un enlace mediante el NI OPC server para la adquisición de datos del prototipo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Automatización

Es el conjunto de técnicas que relacionan sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos, para luego controlar y monitorear procesos, por medio de un software especializado, que se encarga de poner en movimiento a este mecanismo complejo de una forma automática, además en un sistema automatizado ajusta sus operaciones en respuesta a cambios en las condiciones externas como medición, evaluación y control.

2.1.1 Niveles de automatización.

Según (CARVAJAL, y otros, 2012) los niveles de automatización son los siguientes:

2.1.1.1 *Nivel de acción/sensado.* Está compuesto de sensores (termocupla, tacómetros, detectores de proximidad, etc.), actuadores como (motores, válvulas, calentadores, etc.) distribuidos en una línea de procesos. Los elementos de control son ejecutados por los actuadores, mientras que los sensores miden las variables en el proceso (nivel de fluido, caudal, presión, etc.).

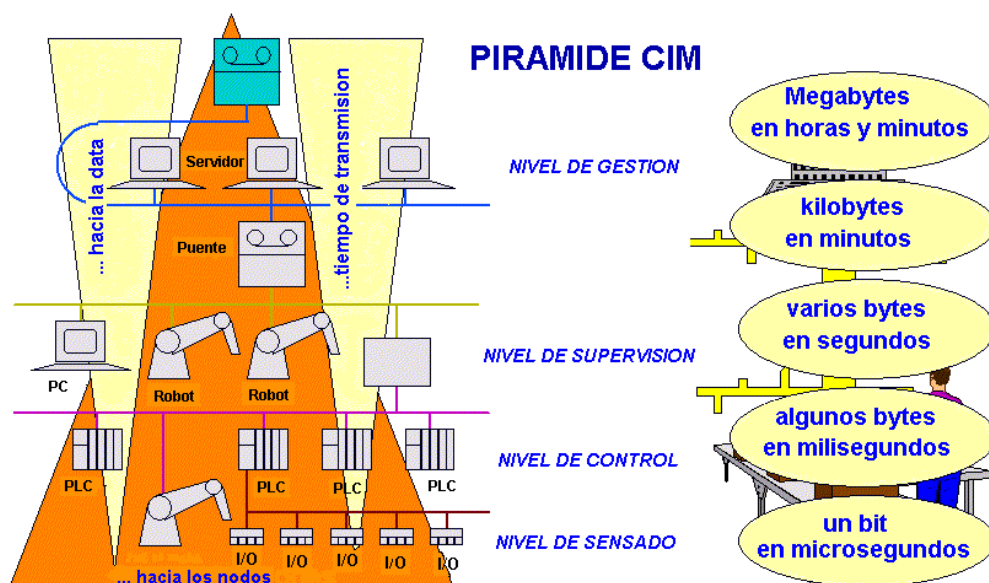


Figura 1-2 Niveles de automatización

Fuente: <http://automatizacion2008.blogspot.com/2008/03/piramide-cim.html>

2.1.1.2 *Nivel de control.* Este nivel está constituido por PLC, o equipos de aplicación basados en microprocesadores como robots, maquinas herramienta o controladores de motores. Estos dispositivos como los actuadores y sensores son programables capaces de realizar el proceso industrial deseado de forma conjunta.

2.1.1.3 *Nivel de supervisión.* En este nivel se puede visualizar y supervisar los procesos de industria, a través de entornos SCADA (Supervisión, Control y adquisición de datos) disponer de un “panel virtual” donde se indican las posibles alarmas, fallos o alteraciones en los diferentes procesos que se llevan a cabo (CARVAJAL, y otros, 2012).

2.1.1.4 *Nivel de gestión.* Este nivel se encarga de gestionar la producción total de la empresa, mantener las relaciones con los proveedores y clientes, comunicar distintas plantas, proporcionar las instrucciones básicas para el diseño y la producción de la empresa, en él se emplean PCs, estaciones de trabajo y servidores de distinta índole (CARVAJAL, y otros, 2012).

2.1.2 *Clases de automatización industrial.*

Las clases de automatización que da a conocer según (MANDADO, 2008) son:

2.1.2.1 *Automatización fija.* Es un sistema de fabricación donde la secuencia de las operaciones es sencilla y está fijada por la configuración de los equipos que lo forman, en esta clase de automatización se necesita equipos especializados para elevados ritmos de producción.

2.1.2.2 *Automatización programable.* Se identifica con los sistemas de fabricación en los que el equipo de producción está diseñado para ser capaz de cambiar la secuencia de operaciones a fin de adaptarse a la fabricación de productos diferentes. La secuencia de producción se controla mediante un programa, que es un conjunto de instrucciones que se pueden cambiar para fabricar un nuevo producto.

2.1.2.3 *Automatización flexible.* Es una extensión de la automatización programable que da como resultado sistema de fabricación en los que no solo se pueden cambiar los programas, además se puede cambiar la relación entre los diferentes elementos que lo constituyen.

2.1.2.4 *Automatización integrada.* Es un sistema de fabricación que integra el diseño asistido por computadora (CAD), la ingeniería asistida por computadora (CAE) y la fabricación asistida por computador (CAM) con la verificación, la comercialización y la distribución, suele recibir el nombre de CIM (acrónimo de Computer Integrated Manufacturing).

2.2 Redes de comunicación industrial

Una red de comunicación industrial se puede definir como el área de la tecnología que estudia la transmisión de información entre circuitos y sistemas electrónicos utilizados para llevar a cabo tareas de control y gestión del ciclo de vida de los productos industriales.

Las comunicaciones industriales deben resolver la problemática de la transferencia de información entre los equipos de control del mismo nivel y entre los correspondientes a los niveles continuos de la pirámide CIM. (MANDADO, 2008).

2.2.1 Clasificación de las redes de comunicación industrial.

Los diferentes tipos de niveles de comunicación que da a conocer según (MANDADO, 2008) son los siguientes:

2.2.1.1 *Redes de datos.* Tiene como principal objetivo transportar grandes paquetes de información de forma esporádica (baja carga), pero a elevada velocidad (gran ancho de banda) para permitir el envío rápido, Se suelen considerar redes de datos a comunicaciones entre los equipos informáticos que forman los niveles de empresa, fábrica, área y en ocasiones, de célula de la pirámide CIM.

2.2.1.2 *Redes de empresa y de fábrica.* Ejecutan programas dedicados a la planificación de recursos de la empresa, gestión de los sistemas de ejecución de la fábrica, programas de diseño, simulación, ingeniería y fabricación asistido por computador, y herramientas de aplicación general que permiten el trabajo en grupo del personal de todas las áreas de la empresa.

2.2.1.3 *Redes de célula.* Están diseñados para el funcionamiento en ambientes hostiles como pueden ser en presencia de fuertes perturbaciones electromagnéticas, temperaturas extremas, polvo y suciedad, etc. Esta red tiene gran seguridad en el intercambio de datos en un intervalo de tiempo cuyo límite superior se fija con exactitud para poder trabajar correctamente en tiempo real, por tanto, su fiabilidad y disponibilidad es elevada en las redes de comunicación mediante la utilización de dispositivos electrónicos.

2.2.1.4 *Redes de control.* También conocidos como buses de campo, resuelven los problemas de comunicación en los niveles de estación y proceso de la pirámide CIM, también se utilizan en el nivel de célula.

2.2.1.5 *Redes de controladores.* Están diseñados para realizar la comunicación de varios sistemas electrónicos de control: autómatas programables, robots, controladores numéricos, terminales de operador, computadores industriales, etc.

2.2.1.6 *Redes de sensores – actuadores.* Están diseñados para intercomunicar los sistemas electrónicos de control con los dispositivos de campo conectados al proceso. Este tipo de redes funcionan en aplicaciones de tiempo real escrito en una pequeña zona de la planta (una máquina o una célula), y se suelen utilizar para comunicar los autómatas programables (PLC) con los dispositivos sensores y/o actuadores del sistema.

2.3 Controlador lógico programable (PLC)

Es un equipo digital electrónico que consta de una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas tales como: lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y operaciones aritméticas, con el objetivo de controlar máquinas y procesos (MORENO, 2009).

2.3.1 *Estructura del PLC.* Las partes fundamentales de un PLC está compuesto por:

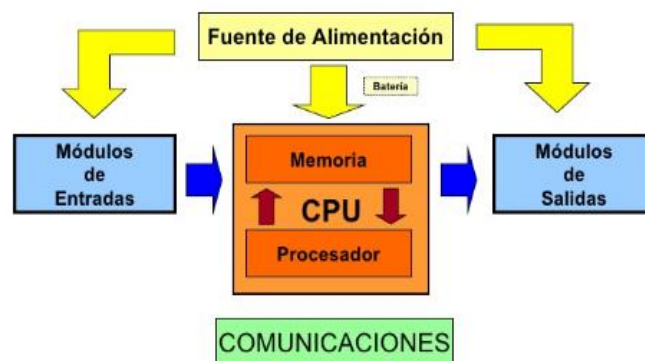


Figura 2-2 Componentes del PLC, diagrama de bloques
Fuente: (MORENO, 2009).

2.3.1.1 *CPU.* Ejecuta el programa desarrollado por el usuario, está compuesto por dos partes esenciales el procesador y la memoria, también puede estar constituido por módulos de comunicación, fuentes de alimentación (MORENO, 2009).

2.3.1.2 *Procesador.* Su actividad principal es procesar el programa desarrollado por el usuario, además tiene otras actividades como: administrar la comunicación entre el dispositivo electrónico de programación y la memoria, además ejecutar programas de autodiagnósticos. (MORENO, 2009).

2.3.1.3 *Memoria.* Son miles de cientos de localizaciones donde la información puede ser almacenada, tanto el sistema operativo como el programa de aplicación, las tablas o registros de entradas y salidas, los registros de variables o bits internos están asociados a diferentes tipos de memorias.

La capacidad de almacenamiento de una memoria suele cuantificarse en bits, bytes o words. El sistema operativo viene gravado por el fabricante, como debe mantenerse inalterado y el usuario no debe tener acceso a él, se guarda en una memoria como las ROM (Memoria de solo lectura), que son memorias cuya información no se puede alterar inclusive con ausencia de alimentación (MORENO, 2009).

2.3.2 *Interfaces de entradas y salidas*

2.3.2.1 *Sección de entradas (I).* Se trata de líneas de entrada, los cuales pueden ser de tipo analógico o digital. En ambos casos tenemos unos rangos de tensión característicos, los cuales se encuentran en las hojas de características del fabricante. A estas líneas conectaremos los sensores, pulsadores, termocuplas, etc. (GALVEZ, 2014).

2.3.2.2 *Sección de salidas (Q).* Son una serie de líneas de salida, que también pueden ser de carácter analógico o digital. A estas líneas conectaremos los actuadores, electroválvulas, etc. (GALVEZ, 2014).

2.3.3 *Lenguaje de programación de un PLC.* Los PLC's manejan lenguajes de programación gráficos, textuales y símbolos lógicos gráficos empleados en el álgebra booleana, al diseñar un bloque lógico se debe determinar el lenguaje de programación que utilizara dicho bloque. Según (SIEMENS, 2015) son:

- Lenguaje de contactos (KOP)
- Lenguaje de funciones (FUP)

2.3.3.1 *Lenguaje de contactos (KOP).* Este tipo de lenguaje de programación gráfico se basa en esquemas de circuitos, tales como los contactores, bobinas y cuadros, combinándose para formar segmentos (SIEMENS, 2015).

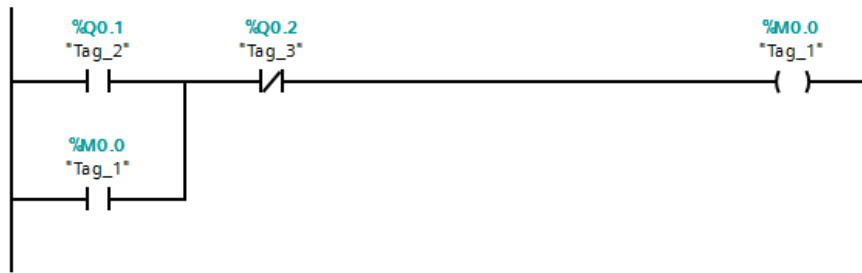


Figura 3-2 Lenguaje KOP

Fuente: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/121/109478121/att_851434/v1/s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf

2.3.3.2 *Lenguaje de funciones (FUP)*. Este tipo de lenguaje de programación dispone símbolos lógicos gráficos utilizados en el álgebra booleana. Para crear la lógica de operaciones complejas, se debe insertar ramas paralelas entre los cuadros.

Las funciones y operaciones matemáticas complejas pueden ser representadas directamente en combinación con los cuadros lógicos (SIEMENS, 2015).

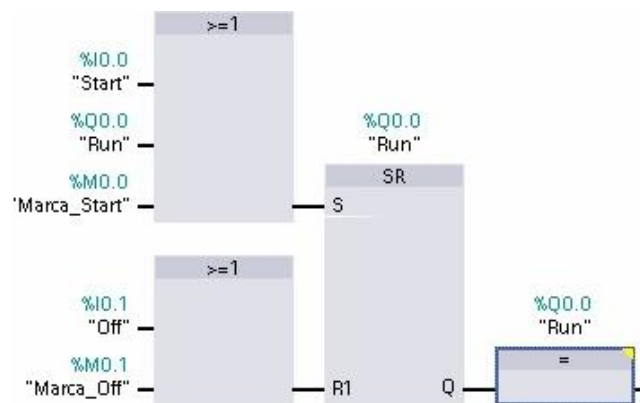


Figura 4-2 Lenguaje FUP

Fuente: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/121/109478121/att_851434/v1/s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf

2.4 PLC SIMATIC S7-1200

El controlador lógico programable (PLC) S7-1200 es un potente controlador por su diseño compacto, configuración manejable y extenso juego de instrucciones, el S7-1200 es indicado para controlar distintas aplicaciones.

La CPU cuenta con un microprocesador, circuitos de entrada y salida E/S de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas, PROFINET integrado, una fuente de alimentación integrada, conformando así un potente controlador.

Una vez cargado el programa en la CPU, esta vigila y controla las entradas y cambia el estado de salida dependiendo del programa realizado por el usuario, que puede incluir lógica booleana, temporizadores y contadores, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos. (SIEMENS, 2015).



Figura 5-2 PLC S7 1200

Fuente: Autores.

2.4.1 *Características principales del SIMATIC S7 - 1200.* Módulos de ampliación. Existen tres tipos de módulos de ampliación según (SIEMENS, 2011) son:

- Signal board (SB)
- Módulos de señales (SM)
- Módulos de comunicación (CM)

2.4.1.1 *Signal board (SB).* Un signal board puede adaptarse directamente a una CPU. De este modo pueden conectarse individualmente las CPU, añadiendo E/S analógicas o digitales sin necesidad de incrementar físicamente el tamaño del controlador. El diseño modular del S7-1200 garantiza que se podrá modificar el controlador para adaptarse perfectamente a distintas necesidades. (SIEMENS, 2011).

2.4.1.2 *Módulos de señales (SM).* La mayoría de los CPU permiten las conexiones de módulos de señales, extendiendo así las posibilidades de utilizar E/S digitales o analógicas adicionales sin necesidad de aumentar el tamaño del controlador. Los SM se acoplan a lado derecho de la CPU, dos módulos de señales se añaden a la CPU 1212C y ocho módulos de señales a la CPU 1214C.

2.4.1.3 *Módulos de comunicación (CM)*. Todas las CPU del S7-1200 pueden extenderse hasta con tres módulos de comunicación lo que facilita todo tipo de comunicación. Los RS485 y RS232 son idóneos para conexiones punto a punto en serie, basadas en caracteres. (SIEMENS, 2011).

2.5 Pantallas HMI

HMI (Human Machine Interface o Interfaz Hombre máquina) es el dispositivo o sistema que realiza la interfaz entre la persona y la máquina. Estos sistemas consisten en paneles compuestos mediante comandos e indicadores, tales como indicadores digitales y análogos, luces piloto, selectores, pulsadores y otros que se conectan con los equipos y sistemas a realizarse (SIEMENS, 2014).

2.5.1 *Software HMI*. Este software además de otras cosas permite las siguientes funciones: interface gráfica de tal manera poder visualizar el proceso e interactuar con él, registro en tiempo real e histórico de datos. Es el software para todas las aplicaciones HMI, comenzando las soluciones de utilización más básicas con Basic Panels hasta las visualizaciones de procesos en sistemas multipuesto basados en PC (SIEMENS, 2014).

2.6 TIA PORTAL V13

TIA portal es el moderno sistema de ingeniería que facilita la configuración de forma intuitiva y eficiente en todos los procesos de planificación y producción. Conquistando por su eficiencia probada y por ofrecer un ambiente de ingeniería agrupando todas las áreas de control, visualización y accionamiento. Además de incluir las versiones actuales de software de ingeniería SIMATIC STEEP 7, WinCC y Startdrive para la planificación, programación diagnóstica de todos los controladores SIMATIC, pantallas de visualización y accionamientos SIMATICS de última generación (SIEMENS, 2012).

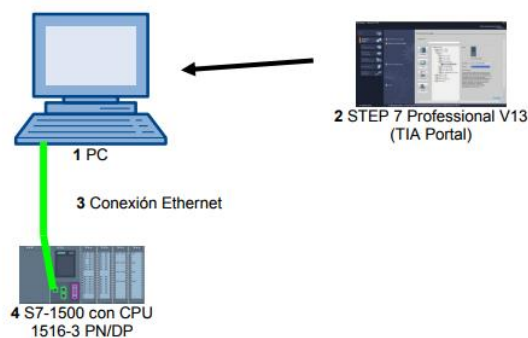


Figura 6-2 TIA PORTAL

Fuente: https://w3.siemens.com/mcms/sce/de/fortbildungen/ausbildungsunterlagen/tia-portal_module/tabcardseiten/documents/sce_es_020-011_r1404_startup_s7-1500_v13.pdf

2.6.1 *Las tareas de automatización más común contienen lo siguiente:*

- Un controlador que monitoree el proceso mediante un software.
- Un panel técnico que ayude a visualizar el proceso (SIEMENS, 2009).

2.6.2 *Ventajas del TIA portal.* Nos permite elaborar una solución de automatización. Entre los más importantes para la configuración según (SIEMENS, 2009) tenemos:

- Elaboración de proyecto
- Configuración del hardware
- Enlaces en red de los dispositivos
- Programación del controlador
- Visualización y configuración
- Configuración de los datos
- Funciones Online para el diagnóstico del proyecto

2.6.3 *Vistas del TIA portal.* Este software consta de dos vistas diferentes que permite ingresar rápidamente a las herramientas y a sus distintos componentes que contiene el proyecto que se esté realizando los que da a conocer (SIEMENS, 2009) son las siguientes:

2.6.3.1 *Vista del portal:* Esta vista soporta la configuración con respecto a las tareas que se estén realizando en el proyecto.

2.6.3.2 *Vista del proyecto:* Soporta la configuración dirigida a los objetos del proyecto.

2.7 **Control PID**

El controlador PID que significa (Control Integral Derivativo) es un control por realimentación que se utiliza ampliamente en las áreas de control por la facilidad que nos ofrece al calcular el error entre un valor medio y un valor deseado.

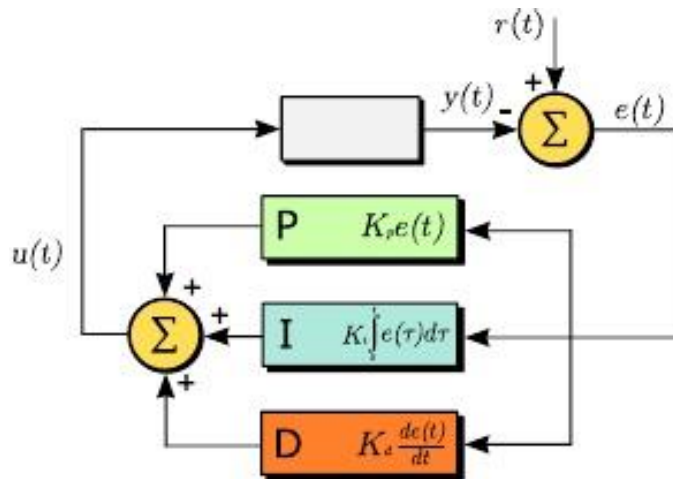


Figura 7-2 Esquema del control PID
Fuente: http://www.academia.edu/16511961/Controlador_PID

El algoritmo del controlador PID está compuesto por tres parámetros como: El Proporcional que depende del error actual, El Integral que depende de los errores pasados y el Derivativo que pronostica los errores futuros. La suma de estas tres acciones es utilizada para ajustar el proceso mediante un elemento de control (KLUG, 2017).

2.7.1 *Funcionamiento.*

Para el correcto funcionamiento del controlador PID que se encarga de regular un proceso o un sistema se necesita de un sensor que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, ultrasónico, etc.) además se debe contar con un controlador que genere una señal para que gobierne un actuador y cambie al sistema de manera controlada (bomba, motor, válvula, etc.).

La señal de error es manejada por cada uno de los tres parámetros del controlador PID ya que la suma de estos tres compone la señal de salida que el controlador utiliza para gobernar al actuador. (KLUG, 2017)

2.7.2 *Acción de control proporcional (P).* Para conseguir que el error en estado estacionario se aproxime a cero se debe dar entre el producto de la señal de error y la constante proporcional, estos valores en diversos casos solo serán excelentes en una determina parte del rango total de control (KLUG, 2017).

La fórmula para el proporcional se puede describir como:

$$P_{sal} = K_p e(t) \qquad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

P_{sal} : Proporcional

K_p : Constante proporcional

$e(t)$: Señal de error

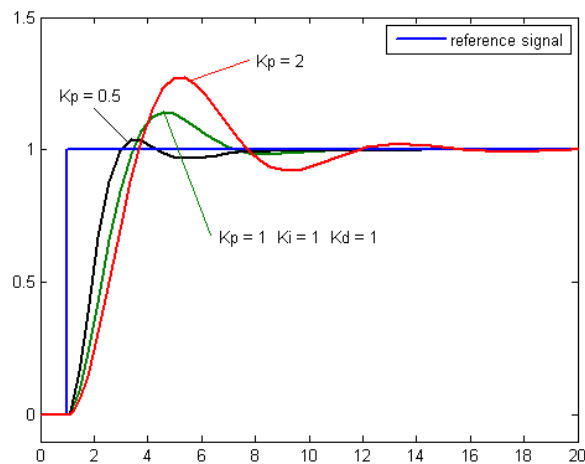


Figura 8-2 Control Proporcional (P)

Fuente: (KLUG, 2017).

2.7.3 Acción de control integral (I). La finalidad del control integral es el de eliminar y disminuir el error en estado estacionario originado por la acción proporcional esto interviene cuando existe una desviación entre la variable y punto de consigna una vez integrado esta desviación se tiene la función de promediarlo o sumarlo por un tiempo determinado.

Este tipo de control se utiliza para eliminar el inconveniente de offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) (KLUG, 2017).

La acción integral tiene como formula la siguiente:

$$I_{sal} = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

I_{sal} : Integral

K_i : Constante integral

$e(t)$: Señal de error

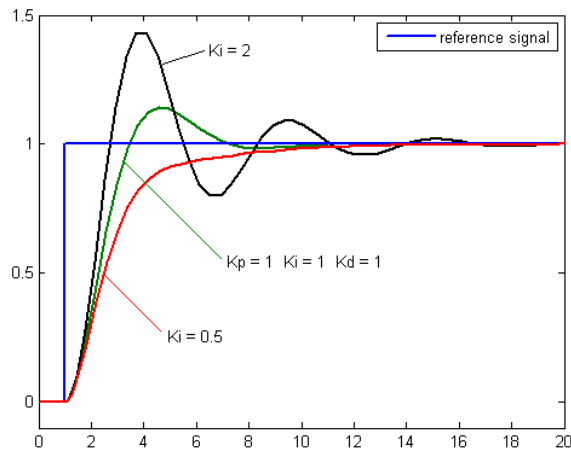


Figura 9-2 Control Integral (I)

Fuente: (KLUG, 2017).

2.7.4 Acción de control derivativa (D). La acción derivativa actúa cuando existe un cambio en el valor absoluto del error si el error es permanente solamente actuaran los modos proporcional e integral, el error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna o conocido también como set point.

La acción derivativa tiene como función mantener el mínimo error corrigiéndolo continuamente con la misma velocidad que producen de tal manera que impida el crecimiento del error (KLUG, 2017).

La fórmula del derivativo está dada por:

$$D_{sal} = K_d \frac{de}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

D_{sal} : Derivativo

K_d : Constante derivativo

$de(t)$: Señal de error

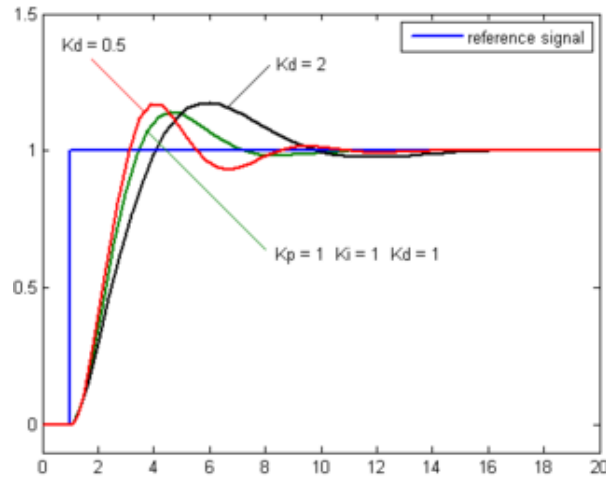


Figura 10-2 Control derivativo (D)

Fuente: (KLUIG, 2017)

2.7.5 Acción de control proporcional – integral – derivativo (PID). Es la combinación de los controladores proporcional, integral, derivativo y recoge las ventajas de cada uno de las acciones de control individual. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

Ti: Acción Integral

Td: Acción Derivativo

u: es la señal de control

e: error de control $e = y_{sp} - y$

La señal de control es la suma de tres términos que son: P (proporcional al error), I (proporcional a la integral del error), D (proporcional a la derivada del error) (ASTROM, y otros, 2009).

Lo que resulta su función de transferencia:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

2.8 NI OPC server

El OPC (OLE for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft que ofrece una interfaz común para la comunicación que permite que componentes software individuales interactúen y compartan datos.

La comunicación OPC se realiza mediante una arquitectura cliente-servidor. El servidor es la fuente de datos (como un dispositivo hardware a nivel de planta) y cualquier aplicación basada en OPC puede ingresar a dicho servidor para leer y escribir cualquier variable que brinde el servidor (GALVEZ, 2011).

2.8.1 Ventajas del OPC server

Las ventajas sugun (GALVEZ, 2011) son:

El usuario puede elegir los productos que mejor se adapten a su sistema de automatización.

La compatibilidad de los dispositivos es totalmente garantizada al contar con driver adecuado.

Los gastos de desarrollo para drivers se reducen a una única interfaz para OPC.

Reduce los costos en el desarrollo de drivers y contribuye a incrementar la productividad.

2.9 Software LabVIEW

El software LabVIEW de la Nacional Instrument es un sistema de programación gráfica diseñado para desarrollar aplicaciones de pruebas, control y medidas. La programación gráfica de LabVIEW lo hace fácil de usar por educadores, investigadores y estudiantes para incorporar el software a varios cursos, proyectos y aplicaciones.

LabVIEW brinda la flexibilidad de un potente lenguaje de programación sin la complejidad de los entornos de desarrollo tradicionales, además ofrece extensas habilidades para adquisición, análisis y presentación en un solo entorno. LabVIEW emplea la programación grafica (lenguaje G) para crear programas basados en diagramas de bloques (NATIONAL INSTRUMENT, 2014).

2.10 Software MATLAB

MATLAB de la abreviatura “Laboratorio de matrices” es una de las herramientas sofisticadas de computación utilizado para procesamiento de señales e imágenes en el área de comunicaciones, de la misma manera se utiliza en el campo de las finanzas, robótica e ingeniería gracias a las características que otorga como la programación de vectores, matrices y POO (programación orientada a objetos).

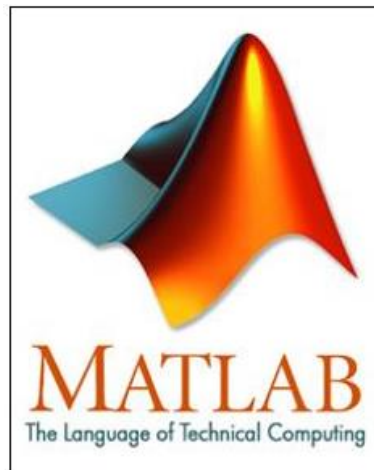


Figura 11-1 Software MATLAB

Fuente: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Este software cuenta con IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) que lo hace amigable en el desarrollo de scripts. El lenguaje “m” es propio de MATLAB, añadiendo que se puede crear interfaz de usuario o GUI, y se puede trabajar en conjunto con otros programas que no usen el lenguaje “m”. Permiten crear algoritmos simples o complejos que trabajan con archivos .txt o dat, en fin, se le puede dar diversos usos a este software en el ámbito de las comunicaciones (MathWorks, 2017).

Actualmente MATLAB se ha convertido en una herramienta estándar para ingenieros y científicos, dado que MATLAB es muy fácil de usar, muchas tareas de programación se los realiza con él.

MATLAB se puede instalar en sistemas operativos como Unix, Windows, Linux y se da soporte en su página oficial (MathWorks, 2017).

2.11 SCADA

El termino SCADA proviene de Supervisory Control And Data Adquisition, lo que significa Supervicion Control y Adquisicion de Datos. Se basa en la adquisición de datos de los procesos

remotos y está diseñado fundamentalmente para funcionar sobre ordenadores en los controles de procesos facilitando la comunicación con los dispositivos de campo de tal manera controla el proceso de forma automática desde un ordenador (GARCIA, 2016).

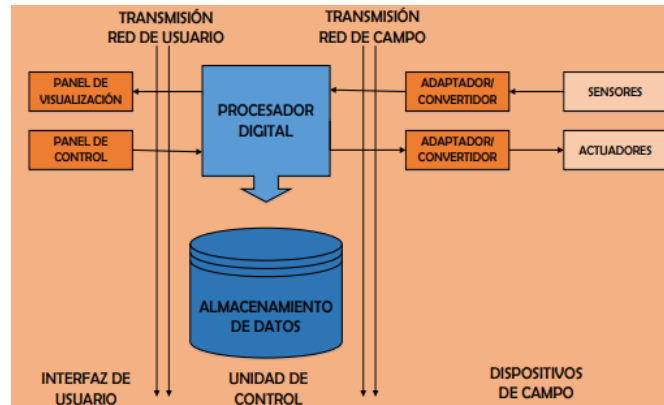


Figura 12-2 Proceso SCADA
Fuente: (GARCIA, 2016).

2.11.1 Características del SCADA. Las principales características con las que cuenta un sistema SCADA es la capacidad de control supervisado, de supervisión. El software es ejecutado sobre un hardware que esta enlazado a un canal de comunicaciones que es a su vez distribuido con los elementos del sistema de control permitiendo comunicarnos con los diferentes autómatas, variadores, sensores y actuadores (GARCIA, 2016).

2.11.2 Funciones del SCADA. Las funciones básicas de un sistema SCADA según (GARCIA, 2016) son las que se detallan a continuación:

- Presentación gráficos de dinámicos
- Generación de reportes
- Supervisión remota de instalaciones
- Control remoto de instalaciones
- Procesamiento de información
- Almacenamiento de información histórica
- Programación de eventos

2.11.3 Componentes del sistema SCADA.

Los componentes que da a conocer (GARCIA, 2016) son los que se detallan a continuación:

2.11.3.1 *Estación maestra.* Se refiere a los servidores y al software responsable para comunicarse con el equipo de campo PLC, RTU, etc. la estación maestra para un sistema SCADA muy corto puede ser un solo computador y si fuera muy extenso pueden ser algunos servidores, aplicaciones de software distribuido.

2.11.3.2 *Unidad terminal remota (RTU).* Esta se conecta al equipo físicamente y toma lectura de los datos de estado si están abiertos/cerrado desde una válvula o un interruptor, lee las medidas como voltaje o corriente, flujo, presión. Por esta unidad se puede enviar señales para interactuar las posiciones de abierto y cerrado (GARCIA, 2016).

2.11.3.3 *Infraestructura y métodos de comunicación.* Los sistemas SCADA cuentan con unas típicas combinaciones de radios y señales directas seriales o conexiones de modem para entender los requerimientos de comunicación.

2.11.4 Requisitos básicos para la elaboración de un sistema SCADA. Los requisitos que da a conocer (GARCIA, 2016) para un entorno de desarrollo son:

La apariencia que va a tener el SCADA

Las funciones y eventos que debe concluir cuando se interactúa con su interfaz HMI

Las operaciones y cálculos que debe realizar con los datos adquiridos

2.12 Medidores de caudal

La medición de los líquidos en los procesos industriales son necesarios para determinar el volumen del fluido consumido en un proceso, con el fin de reducir los costos controlando la cantidad de volumen que se transfiere por la tubería (CREUS, 2010).

2.12.1 Clasificación de los medidores de caudal

2.12.1.1 *Tubo pitot.* Este medidor tiene la función de medir la diferencia entre la presión estática y la presión total dando como resultado la presión dinámica, la cual es proporcional al

cuadrado de la velocidad. Este medidor es sensible a variaciones de velocidad de distribución en la sección de la tubería.

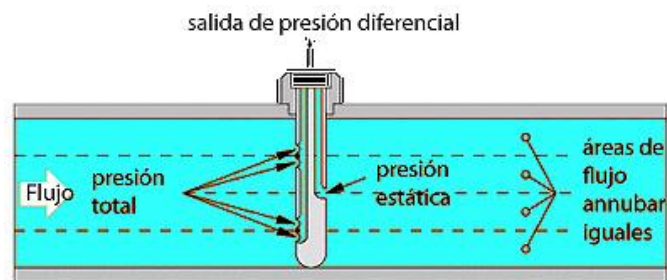


Figura 13-2 Medidor tubo Pitot

Fuente: (CREUS, 2010).

2.12.1.2 *Medidor de codo.* Su principio de funcionamiento se debe a la fuerza centrífuga ejercida por el fluido a su paso por un codo de la tubería, esta fuerza es proporcional al producto *densidad del liquido x velocidad*² e inversamente proporcional al radio del codo.

2.12.1.3 *Medidor de placa.* Este medidor esta constituido por una placa colocada en el centro de la tubería y sometida a la fuerza de impacto del liquido.



Figura 14-2 Medidor de placa

Fuente: (CREUS, 2010).

2.12.1.4 *Medidor magnético.* La tensión inducida a través de un conductor, al moverse este perpendicularmente en un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. En el medidor de caudal el conductor es el líquido y la señal generada es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos. (CREUS, 2010).

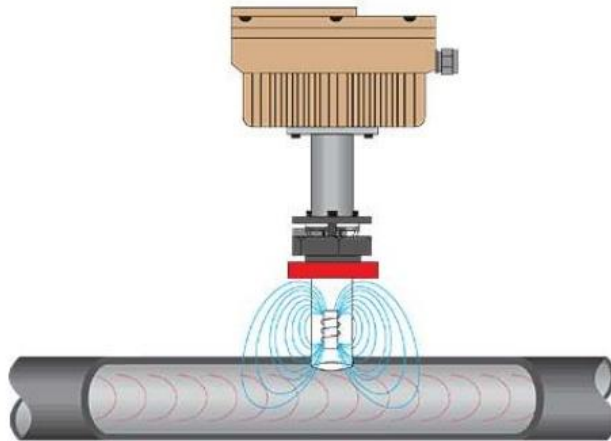


Figura 15-2 Medidor magnético
Fuente: (CREUS, 2010).

2.13 Elementos de control

En los sistemas de control automático de los procesos industriales, las válvulas realizan la función de regulación o variación del caudal de fluido debido a que el líquido es constantemente variable (CREUS, 2010).

2.13.1 Tipos de válvulas

2.13.1.1 *Válvula de globo.* Se caracteriza por el flujo de entrada o salida es perpendicular al eje del obturador, es de vueltas múltiples en el cual el cierre se logra por medio de un disco o tapón que cierra o regula el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería. (CREUS, 2010).

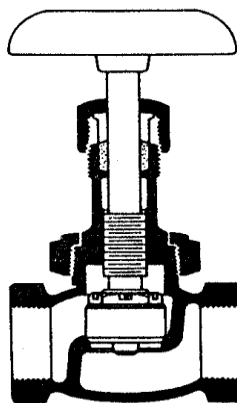


Figura 16-2 Válvula de globo
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.13.1.2 *Válvula de compuerta.* Es de vueltas múltiples, en la cual su cierre se efectúa con un disco vertical plano o tapón que sierra o corta el paso del fluido, y que se mueve verticalmente al

flujo del fluido (CREUS, 2010).

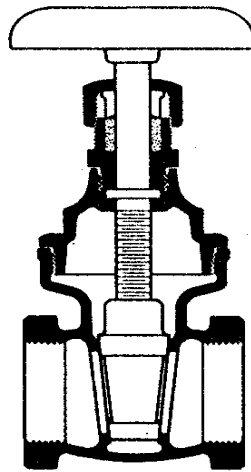


Figura 17-2 Válvula de compuerta

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.13.1.3 *Válvula de mariposa*. Está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular, la válvula de mariposa es de $\frac{1}{4}$ de vuelta y controla la circulación por medio de un disco circular, con el eje de su orificio en ángulos rectos con el sentido de la circulación del fluido (CREUS, 2010).



Figura 18-2 Válvula de mariposa

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.13.1.4 *Válvula de macho*. Es una válvula de bola típica, es de $\frac{1}{4}$ de vuelta, que controla la circulación por medio de un macho cilíndrico o troncocónico con un orificio en el centro igual al diámetro interior de la tubería que se puede mover de la posición abierta a la cerrada mediante un giro de 90° . (CREUS, 2010).

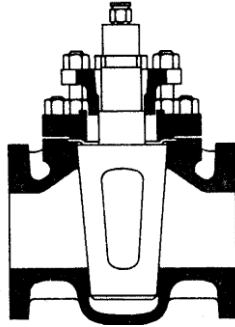


Figura 19-2 Válvula de macho

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.14 Sistemas de bombeo

Un sistema de bombeo se define como un conjunto de elementos tanto mecánicos como eléctricos, que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, la energía que un fluido adquiere en forma de presión o de velocidad y de esta forma cumplir las especificaciones de caudal y presión que son necesarias en los diferentes procesos o aplicaciones que tienen los sistemas de bombeo (SALCEDO, 2005).

2.14.1 Tipos de sistemas de bombeo. Existen muchos tipos de sistemas de bombeo cuyos parámetros, diseño y aplicación tienen una gran cobertura, van desde pequeñas áreas que son utilizadas para dotar de cantidades mínimas hasta grandes sistemas que manejan volúmenes elevados (SALCEDO, 2005).

- Sistema de tanque elevado o de tanque a tanque
- Sistema hidroneumático
- Sistema combinado con tanque compensador.
- Hidroneumático con tanque de presión a entrada registrada

2.14.2 Nomenclatura típica de una instalación de bombeo. Según (SALCEDO, 2005) en toda instalación de bombeo se puede observar perfectamente dos lados:

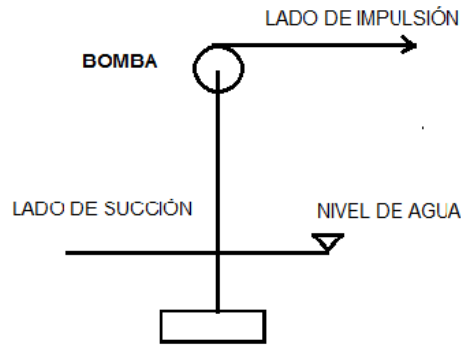


Figura 20-2 Nomenclatura de bombeo
Fuente: (SALCEDO, 2005).

2.14.2.1 *Lado de succión.* En este lado está determinado por la tubería entre válvula anti retorno hasta la boca de la entrada de la bomba.

2.14.2.2 *Lado de impulsión.* Compuesto por una tubería de impulsión que es utilizada para conducir el agua desde el punto de menor cota hasta los puntos de mayor cota.

2.14.3 *Clasificación de las bombas.*

2.14.3.1 *Desplazamiento positivo.* Son aquellas que confinan un volumen de fluido y lo trasladan a otro lugar, dentro de este grupo se encuentran todas las bombas usadas en la oleo hidráulica y de uso frecuente en los quirófanos, bombeo de petróleo de pozos profundos y las usadas en las industrias etc. (SALCEDO, 2005).

2.14.3.2 *Desplazamiento no positivo o rotodinámico.* Son aquellas en que la transferencia de la energía se produce en una superficie mojada por el fluido en la que dicha superficie (alabe) recibe el movimiento debido a la energía mecánica de rotación que recibe de un elemento motriz (SALCEDO, 2005).

CAPÍTULO III

3. CONSTRUCCIÓN, SELECCIÓN Y MONTAJE DE EQUIPOS, DISPOSITIVOS Y MATERIALES.

3.1 CONSTRUCCIÓN

Para construir el módulo didáctico del sistema de control de caudal de agua se debe conocer los equipos, dispositivos (eléctricos, electrónicos y mecánicos), y materiales que se utilizaran en la construcción, además la estructura es el elemento donde se sujetara los equipos de automatización y sus diferentes accesorios que lo conforman.

3.1.1 Construcción del módulo. La estructura está construida con tubo cuadrado de aluminio para aprovechar su bajo peso, que nos permita mejorar el desplazamiento del conjunto, su buena resistencia a la tracción permite soportar el peso al momento que contenga agua en el recipiente cilíndrico, además está constituido con una triplex que ayuda como soporte para el montaje de los dispositivos y accesorios que conforman el sistema de automatización para el control de caudal de agua.



Figura 1-3 Módulo didáctico para control de caudal de agua
Fuente: Autores.

3.2 Selección

3.2.1 Selección de equipos

3.2.1.1 *Motobomba centrífuga.* La motobomba fue adquirida por su potencia de descarga que es suficiente para elevar el líquido al tanque de abastecimiento o distribución, diámetros adecuados para proporcionar un caudal suficiente para el llenado y por sus dimensiones que se adaptan adecuadamente en el módulo didáctico.

Tabla 1-3. Características motobomba centrífuga.

Características de la motobomba centrífuga	
Marca	Weg
Potencia	0.5 HP
Tensión	220/380/440 V
Frecuencia	60 Hz
Caja de conexión	sin caja de conexión
Rotación sincrónica	3480 rpm
Intensidad de trabajo	1.80/1.04/0.90 A
Grado de protección	IP21
Tipo de conexión	Estrella-Triangulo
Rango de temperatura	40° C

Fuente: Autores.



Figura 2-3 Motobomba centrífuga

Fuente: Autores.

3.2.1.2 *Variador de frecuencia.* El variador de velocidad VLT Micro Drive FC 51 fue seleccionado por ser el más adecuado para controlar el arranque de la motobomba centrífuga de ½ HP, el cual controla la distribución del agua hacia el tanque de almacenamiento, el variador

controla distintas aplicaciones como pueden ser el control de velocidad, temperatura, voltaje.

Tabla 2-3. Características del variador de frecuencia.

Características del variador de frecuencia VLT Micro Drive FC 51	
Marca	Danfoss
Potencia	0,5 HP
Tensión de alimentación	200ca - 240 Vca variación del 10%
Frecuencia de alimentación	50/60 Hz
Integración	Automatización SIMATIC S7-1200
Rango de temperatura	40 ° C
Entradas analógicas	2
Salidas analógicas	1
Intensidad de entrada	6,5 A
Intensidad de salida	2,3 A

Fuente: Autores.



Figura 3-1 Variador de frecuencia

Fuente: Autores.

3.2.1.3 *Controlador lógico programable (PLC) SIMATIC S7 - 1200.* PLC SIMATIC S7-1200 serie 1214C AC/DC/RLY la adquisición de este equipo fue por sus características técnicas y alto rendimiento, en este dispositivo electrónico se va a realizar la programación que se encargara de controlar los distintos procesos. Mediante la salida analógica que contiene el PLC al adicionarle el signal board (tablero de señales) se podrá controlar la velocidad de la motobomba centrífuga de ½ HP.

Tabla 3-3. Características del PLC - 1200

Características del PLC SIMATIC S7-1200 serie 1214C AC/DC/RLY	
Intensidad disponible 24 V DC	400 mA máx. (alimentación de sensores)
Memory Card	SIMATIC Memory Card (opcional)
Comunicación	Ethernet
Conexiones	1 para programadora 3 para HMI y CPU a CPU 8 para instrucciones Ethernet
Rango de tensión	De 85 a 264 V AC
Entradas digitales	14
Salidas digitales	10
Entradas analógicas	2
Salida analógica	1 al integrar el Signal Board

Fuente: Autores.



Figura 4-3 PLC SIMATIC S7 - 1200

Fuente: Autores.

3.2.1.4 *Signal board SB 1232.* Fue necesario adquirir un signal board debido a que se requiere algunas entradas y salidas analógicas adicionales para trabajar en conjunto con el PLC 1214C.

Tabla 4-3. Características Signal board

Características Signal Board SB 1232	
Marca	Siemens
Dimensiones A x A x P (mm)	38 x 62 x 21 (mm)
Peso	40 gramos
Salidas analógicas	1
Rango	$\pm 10 \text{ V} / 0 - 20 \text{ mA}$
Resolución	Tensión: 12 bits Intensidad: 11 bits
Precisión (25° C / 0 a 55° C)	$\pm 5\% / \pm 1\%$ de rango máximo
Impedancia de carga	Tensión: $\geq 1000 \Omega$ Intensidad: $\leq 600 \Omega$

Fuente: Autores.

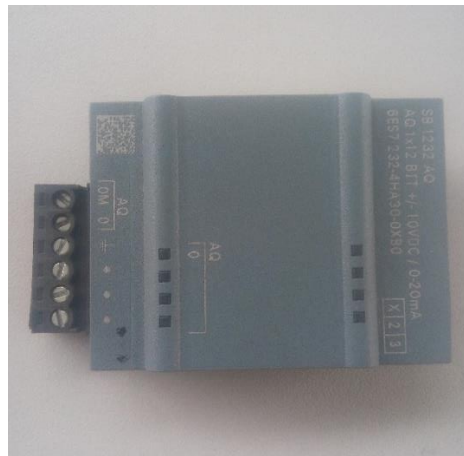


Figura 5-3 Signal board

Fuente: Autores.

3.2.1.5 *Pantalla HMI.* La KTP 600 permite manejar el proceso de forma manual las diferentes órdenes para el control de caudal de agua, la pantalla permite realizar una simulación en tiempo real de un proceso y así monitorear el comportamiento de todo el sistema, como también se puede visualizar señales de alarma.

Tabla 5-1. Características pantalla HMI

Características de la pantalla KTP 600	
Tipo	Pantalla táctil analógica resistiva
Resolución	320 x 240
Teclas de función	6
Colores representables	256
Tensión nominal	24 V
Memoria de aplicación	512 kBytes

Fuente: Autores.



Figura 6-3 Pantalla HMI KTP 600

Fuente: Autores.

3.2.2 Selección de dispositivos.

3.2.2.1 *Breaker*. Es un dispositivo que se utiliza como un elemento de protección con la capacidad de suspender o abastecer a un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente supera una cantidad determinada o se produce un corto circuito actuando de manera eficaz y previniendo daños en los equipos eléctricos, además que es muy útil para la suspensión de cortes de energía cuando se requiere realizar tareas de mantenimiento a los equipos que se encuentran en el circuito.

Tabla 6-3. Características del breaker

Características del breaker	
Marca	Steck
Voltaje	400 V
Frecuencia	50/60 Hz
Numero de polos	2
Tensión nominal	24 V
Serie	SDZ2PC4

Fuente: Autores.



Figura 7-3 Breaker
Fuente: Autores.

3.2.2.2 *Sensor ultrasónico.* Se ha seleccionado este tipo de dispositivo debido a su aplicación y principio de funcionamiento que puede medir distancias entre 5mm y 800mm libre de contactos mecánicos. Estos sensores son utilizados únicamente en el aire ya que emiten una señal de sonido y cuentan el tiempo que la señal tarda en regresar al sensor y está a su vez es enviada a un controlador programable. Los materiales sensados pueden ser solidos o líquidos.

Tabla 7-3. Características Sensor ultrasónico

Características del sensor ultrasónico	
Rango de detección	50-800 mm
Zona ciega	0- 50 mm
Frecuencia de Transductor	3255 kHz
Retardo de respuesta	100 ms
Salida analógica	0-10 V
Tención de trabajo U_B	15-30 V CC

Fuente: Autores.



Figura 8-3 Sensor ultrasónico
Fuente: Autores

3.2.2.3 *Sensor de flujo (caudalímetro).* La adquisición de este dispositivo fue por sus características y su funcionamiento, este sensor es muy simple debido a que genera pulsos de salida a una velocidad proporcional a la del flujo, en la parte posterior hay una flecha indicando la dirección del flujo.

Tabla 8-3. Características del sensor de flujo (caudalímetro)

Características del caudalímetro	
Modelo	YF-S201
Voltaje de operación	5 V – 18 V DC
Temperatura de funcionamiento	-25°C a 80°C
Rango de funcionamiento	1-30 L/min
Presión de funcionamiento máximo	1.75 MPa (17 bar)
Volumen promedio por pulso	2.25 mL

Fuente: Autores.



Figura 9-3 Sensor de flujo (caudalímetro)

Fuente: Autores.

3.2.2.4 *Sensor de presión.* Se ha seleccionado un sensor de presión para verificar las variaciones que existan durante el control de caudal y a su vez inspeccionar si existe una sobrepresión en el sistema lo cual nos ayudara a evitar daños prematuros en la bomba.

Tabla 9-3. Características Sensor de presión

Características del sensor de presión	
Voltaje	12 a 24 VDC
Muestra del periodo	(100,250,500,1000) ms
Tiempo de respuesta	(2, 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000) ms
Rango de temperatura de funcionamiento	(0 a 50) °C
Rango de medición	-100kPa ~ 1000kPa

Fuente: Autores.











Figura 10-3 Sensor de presión
Fuente: Autores.

3.2.3 Selección de materiales. A continuación se especifica cada uno de los materiales que se utilizarán en la construcción del módulo para control de caudal de agua.

3.2.3.1 . *Tubería y accesorios.* En la siguiente tabla se puntualiza los accesorios utilizados.

Tabla 10-3. Tuberías y accesorios

Lista de tuberías y accesorios	
Imagen	Descripción
	Tubo es un accesorio que facilita la transportación del agua de un lugar a otro.
	Codo de 90 este accesorio permite el cambio de dirección de la tubería
	Neplo es un accesorio que nos ayuda a la unión de dos cuerpos con rosca hembra.
	Unión sencilla ayuda a enlazar dos tuberías o accesorios de rosca tipo macho
	T este accesorio facilita la incrementación de una línea de tubería en dos direcciones

	<p>Adaptador para depósito permite la conexión entre un recipiente y las líneas de distribución de fluido</p>
	<p>Válvula de esfera nos permite abastecer o cortar el suministro de agua</p>
	<p>Teflón este se lo utiliza envolviendo en las roscas para evitar fugas prematuras y obtener un mejor apriete entre las roscas hembras y machos</p>

Fuente: Autores.

3.2.3.2 Cable de red.



Figura 11-3 Cable de red

Fuente: <http://www.portalprogramas.com/milbits/informatica/redes-casa-cable.html>

3.2.3.3 *Riel DIN*. Es utilizado para el montaje de elementos o componentes del sistema para mayor seguridad.

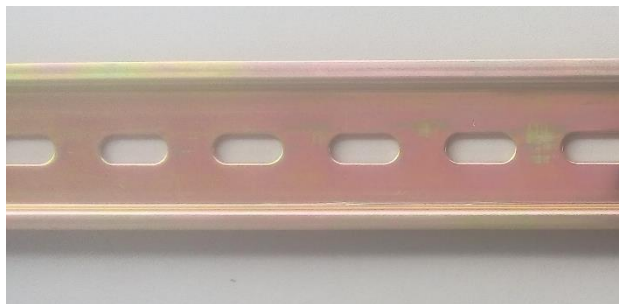


Figura 12-3 Riel DIN

Fuente: Autores.

3.3 Montaje

Para el montaje de los distintos elementos o componentes que forman el módulo didáctico para el control de caudal de agua se ha considerado el espacio físico con el que cuenta el módulo, en donde irán ubicados los elementos de control tales como: motobomba centrífuga, variador de frecuencia, HMI y demás componentes, ubicándolos de tal manera que no interfieran ni obstruyan el libre manejo de los equipos y así conseguir un buen funcionamiento del sistema.

3.3.1 Montaje del breaker. Para la colocación de este elemento se procedió al taladrado de la madera MDF posteriormente se sujetó un riel DIN con la finalidad de poder montar el breaker para la protección de los equipos que se utilizarán en el módulo didáctico esta conexión se la realiza en serie con los elementos de potencia.



Figura 13-3 Breaker

Fuente: Autores.

3.3.2 Montaje del variador de frecuencia. Para la ubicación de este dispositivo se procedió a realizar una perforación con el taladro en la madera MDF con el objetivo de sujetar adecuadamente en el módulo didáctico para ello se atornillo con pernos y tuercas para tener una mayor seguridad del equipo.



Figura 14-3 Variador de frecuencia
Fuente: Autores.

3.3.3 Montaje de los tanques y las líneas de distribución. Se construyeron dos tanques de cristal, el tanque A de manera rectangular con medidas de 25x50x30 que se utilizara para la succión del agua, y el tanque B es de forma cilíndrica con un radio de 40 cm y con altura de 45cm que se utilizara para la descarga del agua, para la succión y la descarga del agua se procedió a realizar las conexiones necesarias en los dos embaces y respectivamente hacia la bomba por medio de tubos y accesorios PVC para la circulación del líquido.



Figura 15-3 Tanques de succión y descarga
Fuente: Autores.

3.3.4 Montaje de la bomba centrífuga. Este equipo ha sido colocado con la ayuda de dos rieles DIN de 25 cm para poder sujetar la bomba en el módulo de manera adecuada y segura para el correcto funcionamiento del equipo y disminuir las vibraciones que puedan generarse.



Figura 16-3 Motobomba centrífuga

Fuente: Autores.

3.3.5 Montaje del caudalímetro. Se procedió a instalar el dispositivo con ayuda de herramientas para la realización del roscado del tubo PVC y colocar el medidor de caudal YF-S201 mediante los accesorios de acople además se utilizó teflón para un mejor apriete y evitar fugas a futuro.



Figura 17-3 Caudalímetro YF-S201

Fuente: Autores.

3.3.6 Montaje del PLC y HMI. Para el montaje de estos elementos se procedió a la perforación de la madera MDF mediante el taladrado para luego sujetar la base donde se encuentra instaladas los equipos HMI y el PLC por medio de pernos y tuercas para tener una mayor seguridad de los equipos.



Figura 18-3 Pantalla HMI, PLC-1200
Fuente: Autores.

CAPÍTULO IV

4. PROGRAMACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL PID PARA CAUDAL DE AGUA Y EL SCADA

4.1 Configuración del sistema en TIA portal V13

4.1.1 Creación del proyecto. Para llevar a cabo la creación de un nuevo proyecto dentro del software TIA PORTAL V.13 se debe abrir el programa, una vez abierto, dentro de la pantalla se debe dar clic en la pestaña “crear proyecto”; luego se deberá llenar los campos como nombre del proyecto, la ruta donde se va a guardar el proyecto, el autor y comentario.

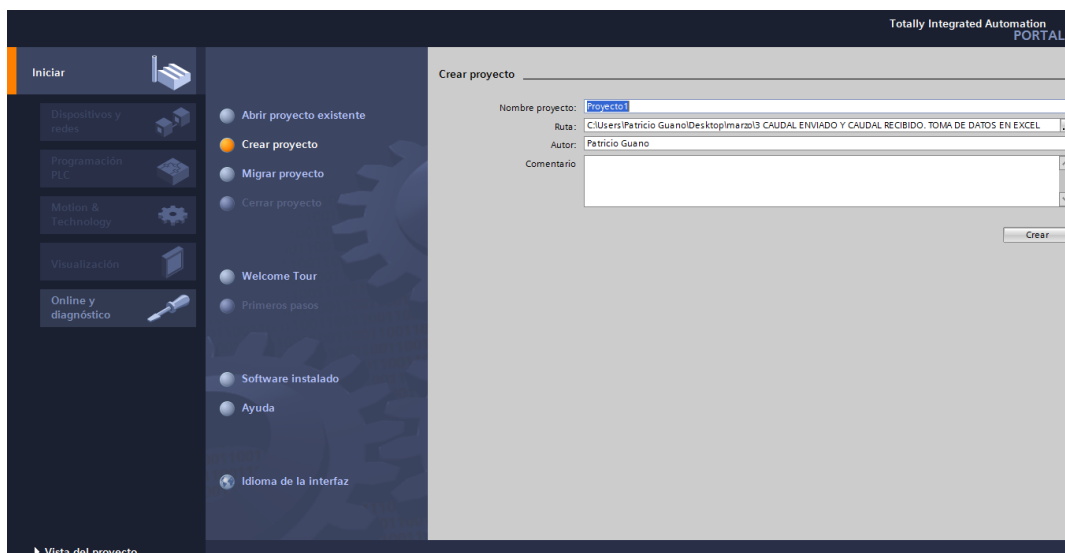


Figura 1-4 Pantalla de inicio del TIA PORTAL

Fuente: Autores.

Luego de haber llenado los datos del proyecto dar clic en el botón “Crear” ubicado en la parte inferior de la pantalla antes mencionado.

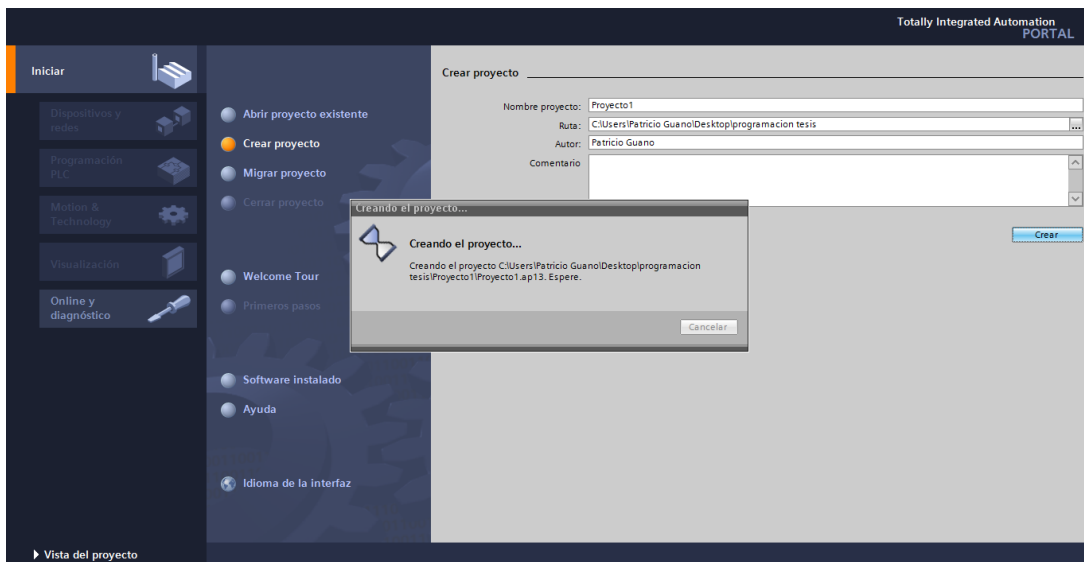


Figura 2-4 Creación del nuevo proyecto
Fuente: Autores.

Luego de haber creado el proyecto, aparecerá la ventana frontal, se deberá dar clic en la pestaña “Configurar un dispositivo” para esta programación.

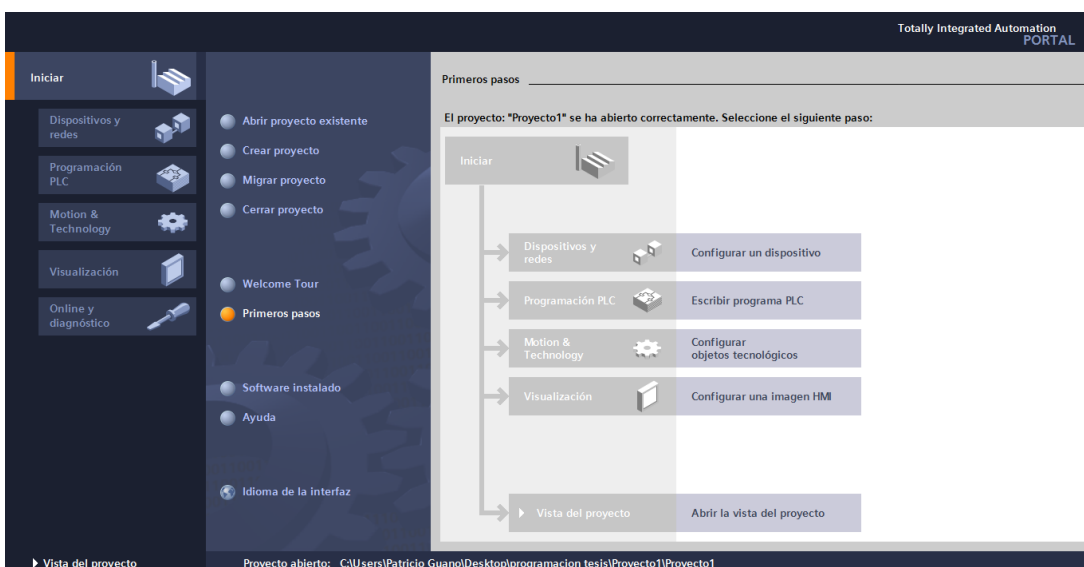


Figura 3-4 Pantalla de primeros pasos
Fuente: Autores.

4.1.2 Selección de equipos. Se identifica los equipos que serán utilizados en la programación para luego ser configurados, en la ventana siguiente dar clic en la opción “Agregar dispositivo”. Para realizar la configuración se debe seguir los siguientes pasos:

- Seleccionar el controlador deseado, para este caso agregar el PLC S7-1200 seleccionando el CPU 1200 sin especificar y se determina. Dentro de la opción versión en la parte derecha

de la pantalla seleccionar “V3.0” dependiendo la versión del PLC que se utilice para trabajar.

- Clic en agregar, una vez agregado el dispositivo aparecerá en la pantalla en nuevo equipo agregado.

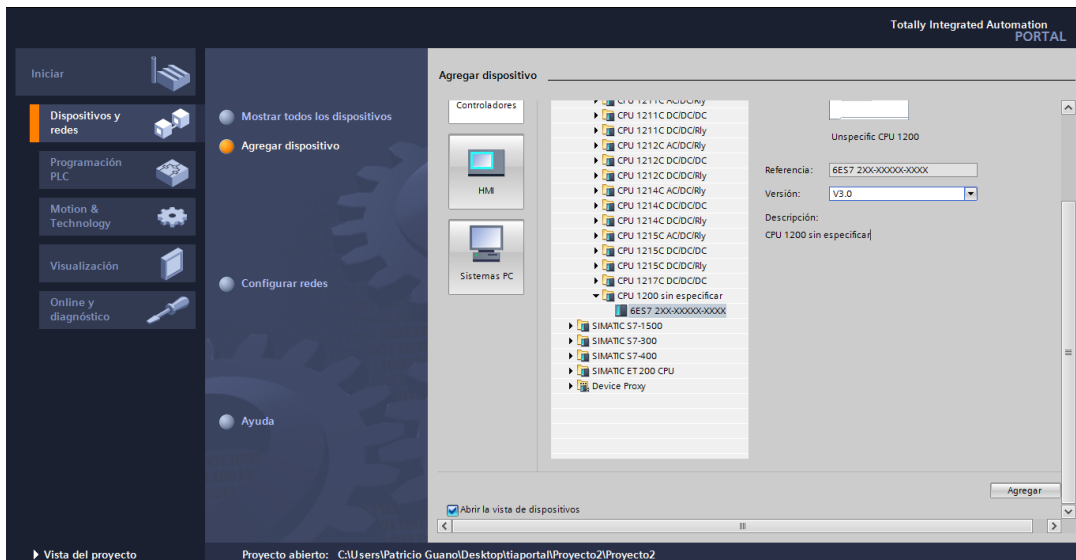


Figura 4-1 Agregación de nuevo dispositivo

Fuente: Autores.

Luego de haber agregado el dispositivo de debe dar clic en determinar el dispositivo conectado.

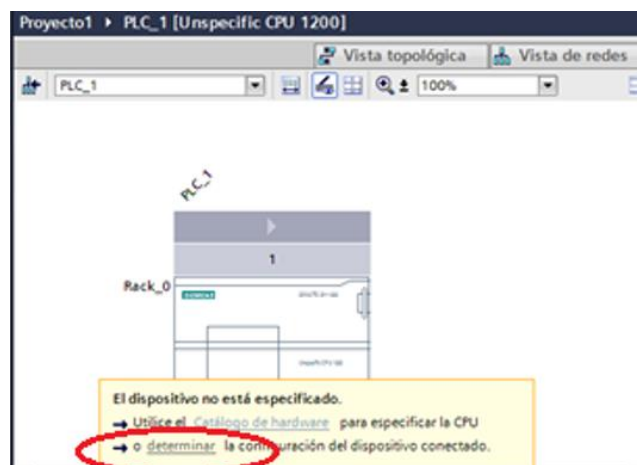


Figura 5-4 Pantalla del dispositivo agregado

Fuente: Autores.

Tras a ver seleccionado la CPU en el cuadro de dialogo online pulsar el botón de carga, STEP 7 carga la configuración de hardware de la CPU.

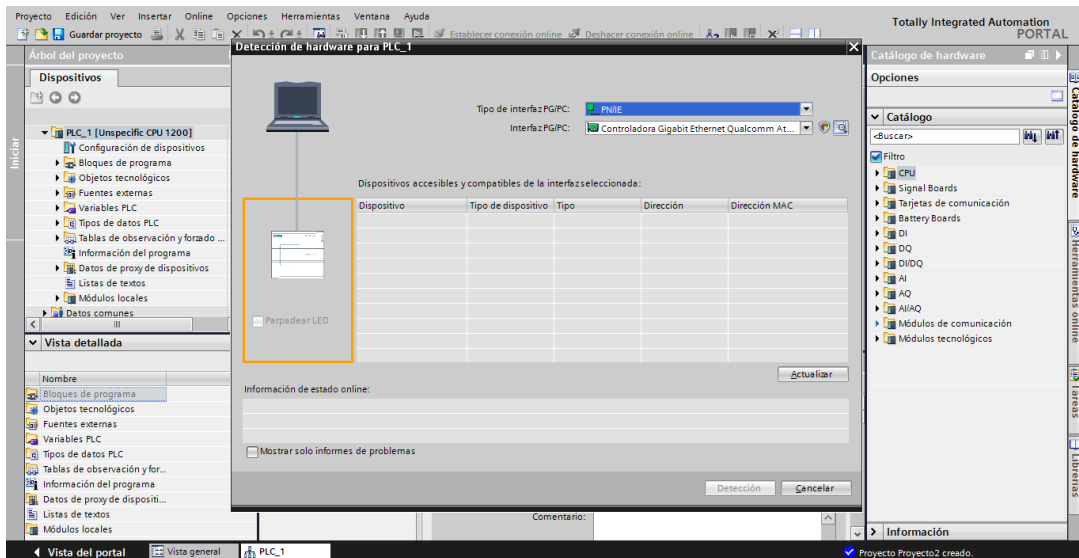


Figura 6-4 Detección del hardware para el PLC

Fuente: Autores.

En la parte izquierda en el árbol del proyecto, dar doble clic en “agregar dispositivo” seleccionar HMI SIMATIC Basic Panel, y escoge la KTP600 Basic Panel con referencia “6AV6 647-0AD11-3AX0”.

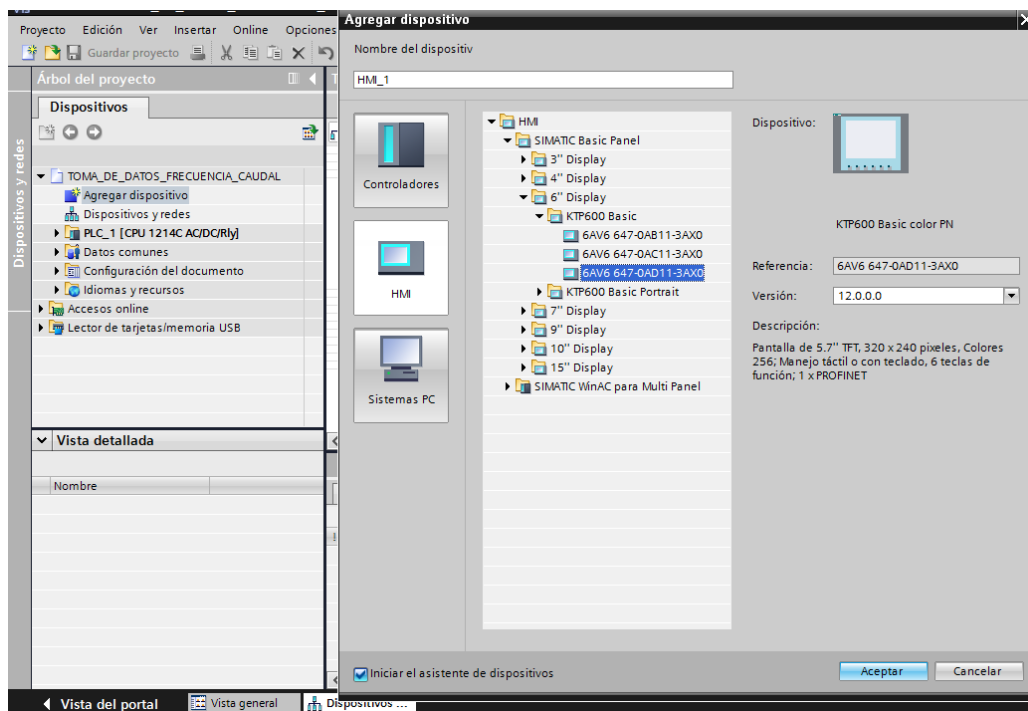


Figura 7-4 Añadir nuevo dispositivo

Fuente: Autores.

4.1.3 Dispositivos añadidos. Los dispositivos que serán utilizados para la programación son signal board SB 1232 y la interfaz HMI.

4.1.3.1 Signal board SB 1232. Para añadir el dispositivo signal board SB 1232 se debe buscar

a lado derecho de la pantalla, en este caso en el menú “Signal Board” luego “AQ 1x12 BIT” seleccionar el modelo del dispositivo “6ES7 232-4HA30-0XB0”. Presionando doble clic sobre el modelo del signal board.

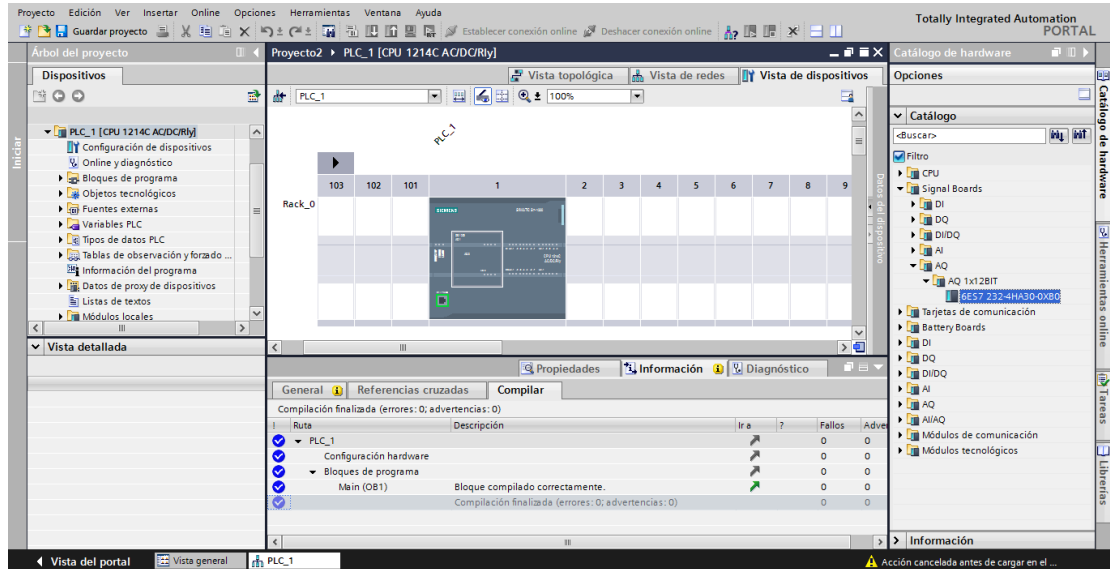


Figura 8-4 Agregar Signal Board
Fuente: Autores.

4.1.4 Interfaz PROFINET. Para crear un enlace entre el PLC S7-1200 y la pantalla HMI SIMATIC Basic Panel mediante la red profinet, en el portal del proyecto de debe dar doble clic en “Dispositivos y redes” aquí se muestran todos los dispositivos agregados anteriormente; en los módulos se encuentran un puerto de comunicación profinet de forma rectangular de color verde.

Se debe unir los módulos de comunicación dando clic en el puerto del PLC y arrastrándolo hasta el puerto de comunicación del HMI posteriormente se visualiza que el PLC y el HMI se quedan enlazados por medio del conductor PN/IE_1.

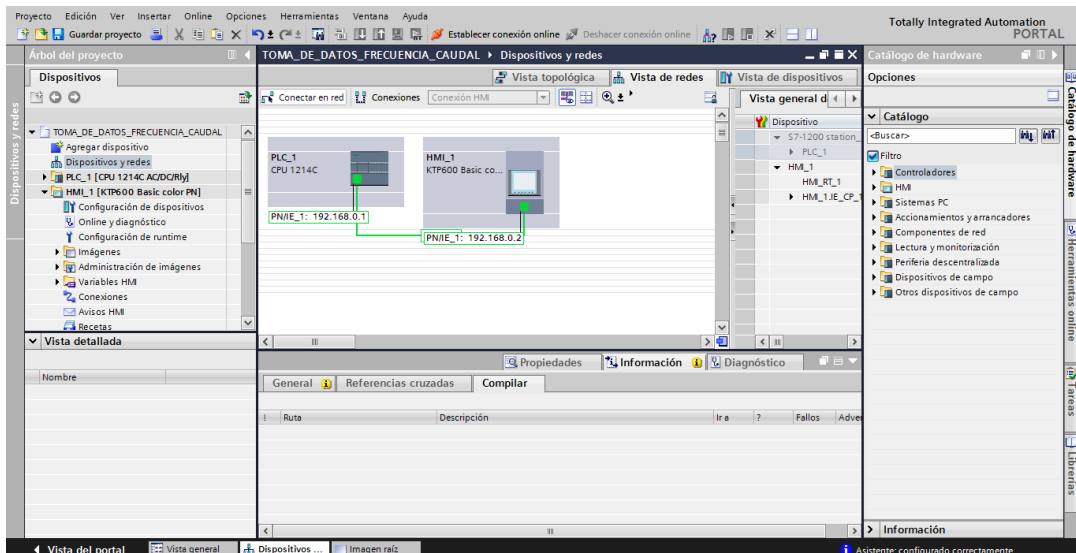


Figura 9-4 Enlace entre PLC y el HMI vía Profinet

Fuente: Autores.

4.1.5 Programación del equipo PLC S7-1200. A continuación, se muestra la programación detallando los elementos y la función que cumplen cada uno de ellos.

4.1.5.1 Segmento 1. Programación del encendido y apagado de la bomba con el variador de velocidad

- La primera línea de programación sirve para el encendido y apagado de la bomba, el M10.0 permite realizar la orden de ejecución desde el ordenador mientras que M7.0 Y M7.1 facilitará la manipulación desde la pantalla HMI.
- La segunda línea es la programación del sensor ultrasónico que permite el encendido y apagado automático de la bomba en caso de que exista sobre nivel.
- La tercera línea respecto a las variables (NORM_X y ESCALE_X), donde el NORM_X tiene la función de normalizar la señal analógica ingresada desde LabVIEW, MW16 nombrada “in_a_lv” para esto la representa una escala lineal con un mínimo de 0 y un máximo de 60 esta escala será la de la frecuencia (Hz) mediante la cual se podrá incrementar o disminuir la velocidad de la bomba con respecto al caudal requerido.
- El SCALE_X escala el valor de la entrada VALUE mapeando, lo cual ejecutará la instrucción escalar, el número que ingresa a VALUE es flotante el cual escala el rango de valores definidos en un mínimo de 0 y un máximo de 27648 transformando a una salida de número entero lo cual enviará el dato al variador de frecuencia.

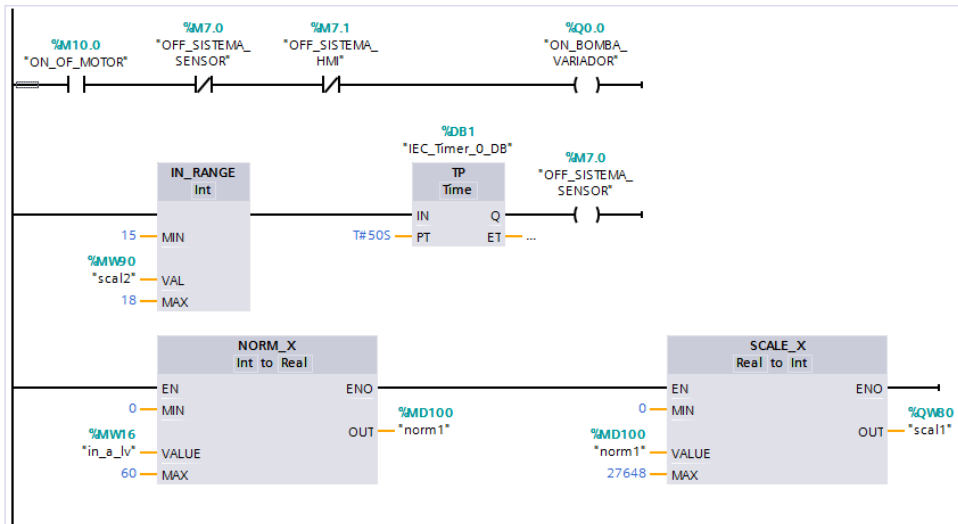


Figura 10-4 Programación segmento 1
Fuente: Autores.

4.1.5.2 Segmento 2. Programación del sensor ultrasónico.

- El segmento número dos consta de dos líneas en la primera con respecto a las variables (NORM_X y ESCALE_X), donde el NORM_X tiene la función de normalizar la señal analógica IW64 para esto la representa una escala lineal con un mínimo de 0 y un máximo de 27648.
- El SCALE_X escala el valor de la entrada VALUE mapeando, lo cual ejecutará la instrucción escalar, el número que ingresa a VALUE es flotante el cual escala el rango de valores definidos en un mínimo de 0 y un máximo de 32 transformando a una salida de número entero lo cual se obtendrá un dato para ejecutar una orden de encendido o apagado del sensor ultrasónico.

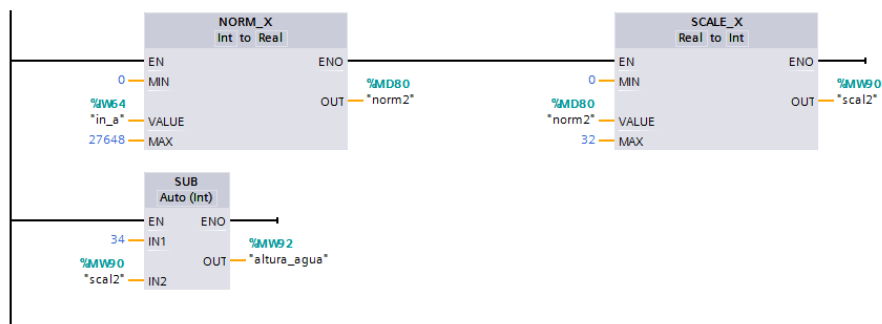


Figura 11-4 Programación segmento 2
Fuente: Autores.

4.1.5.3 Segmento 3. Programación del sensor de presión.

- La programación del sensor de presión determina dos salidas una con presión baja de trabajo y la otra con presión alta esta última ayudará a la verificación del correcto funcionamiento del sistema dando un aviso que el sistema está trabajando inadecuadamente a cuál se podrá visualizar en la pantalla HMI y en LabVIEW.

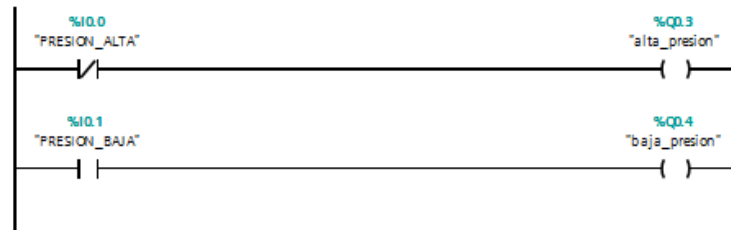


Figura 12-4 Programación segmento 3
Fuente: Autores.

4.1.6 Programación de la pantalla HMI. Una vez realizado la configuración de la pantalla HMI se procede a realizar las diversas presentaciones de las pantallas con la finalidad de poder visualizar el trabajo además de poder controlarlo de forma manual o automática, en este caso contaremos con la presentación de la pantalla y el sistema de bombeo.

- Presentación de la pantalla. Para este punto se configura la imagen raíz con otra prediseñada en formato JPG con una resolución alta para evitar el megapixelado, aquí se colocará el nombre de la institución datos personales y el título del trabajo de titulación.

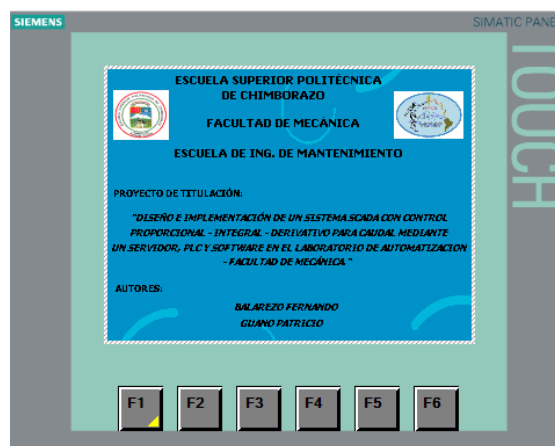


Figura 13-4 Pantalla de presentación HMI
Fuente: Autores.

- Sistema de bombeo. Esta pantalla consta de la simulación del sistema de bombeo un botón para el encendido y apagado de la bomba y tres indicadores que permita visualizar el SP de

caudal (lt/min), Caudal (lt/min), y el consumo (lt), para la visualización de la presentación del sistema de bombeo de debe presionar la tecla F1.

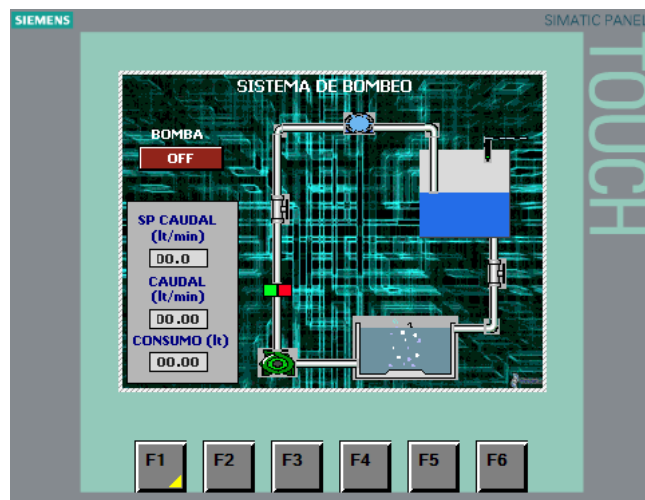


Figura 14-4 Pantalla del proceso

Fuente: Autores.

4.2 Conexión entre LabVIEW y PLC utilizando NI-OPC server

4.2.1 Creación del NI OPC server. Para realizar el enlace entre el software y el PLC se debe empezar creando y configurando el NI OPC Server. Por medio de este enlace se obtendrá datos en tiempo real gracias a la comunicación entre los controladores del proceso, estos se enlazan con las direcciones del controlador del proceso productivo.

Una vez creado el NI OPC Server, se añade un nuevo canal, seguidamente se despliega una pantalla en la que se configura los parámetros requeridos, posteriormente escoger el adaptador del computador.

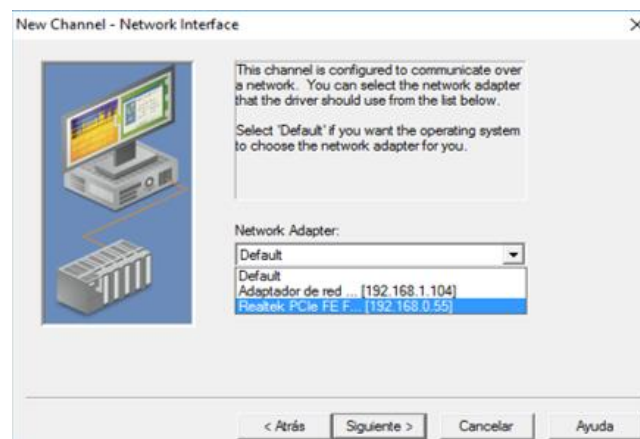


Figura 15-4 Selección del adaptador

Fuente: Autores.

4.2.2 Selección del dispositivo PLC. Una vez agregado el controlador utilizado para la interfaz se elegirá el dispositivo instalado, en este caso es un PLC S7-1200.

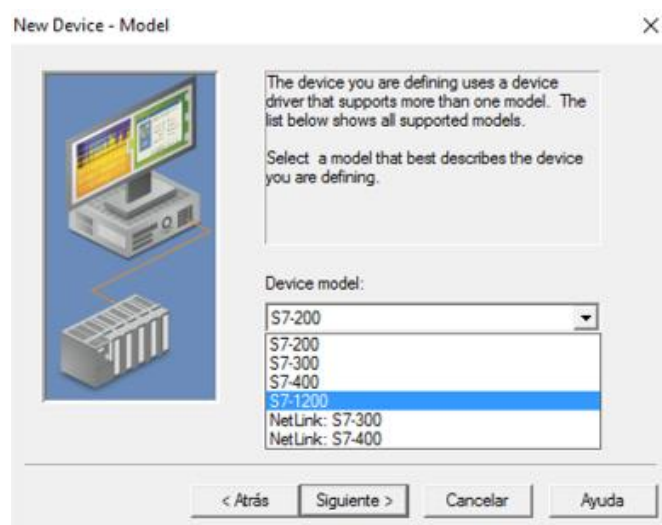


Figura 16-4 Selección del PLC en NI OPC
Fuente: Autores.

Asignada la dirección 192.168.0.1 del controlador lógico programable para poder obtener con facilidad las variables que se encuentran registradas en el controlador.

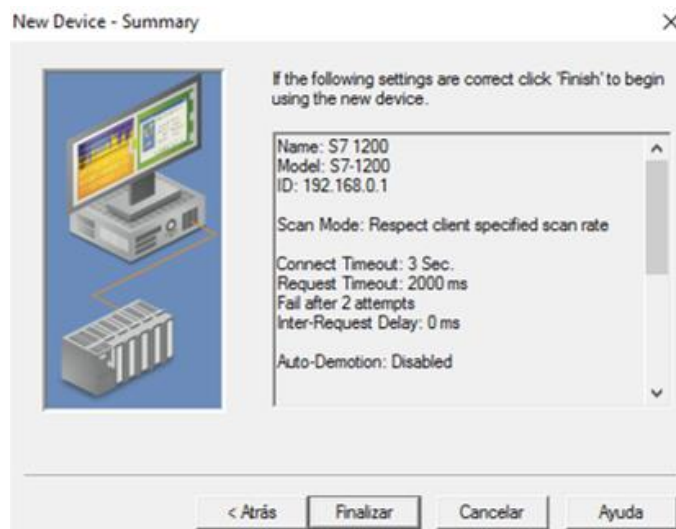


Figura 17-4 Configuración de la dirección del dispositivo
Fuente: Autores.

4.2.3 Creación de memorias de interfaz para la comunicación entre LabVIEW y PLC. Para la creación de las Tags se utilizan las memorias o variables que se encuentran en el controlador lógico programable con sus respectivas direcciones, para controlar el sistema de control de caudal de agua. En la ventana que se muestra se debe asignar un nombre, dirección de la variable a enlazar, tipo de dato y se ubica el tipo de acceso ya sea escritura/lectura.

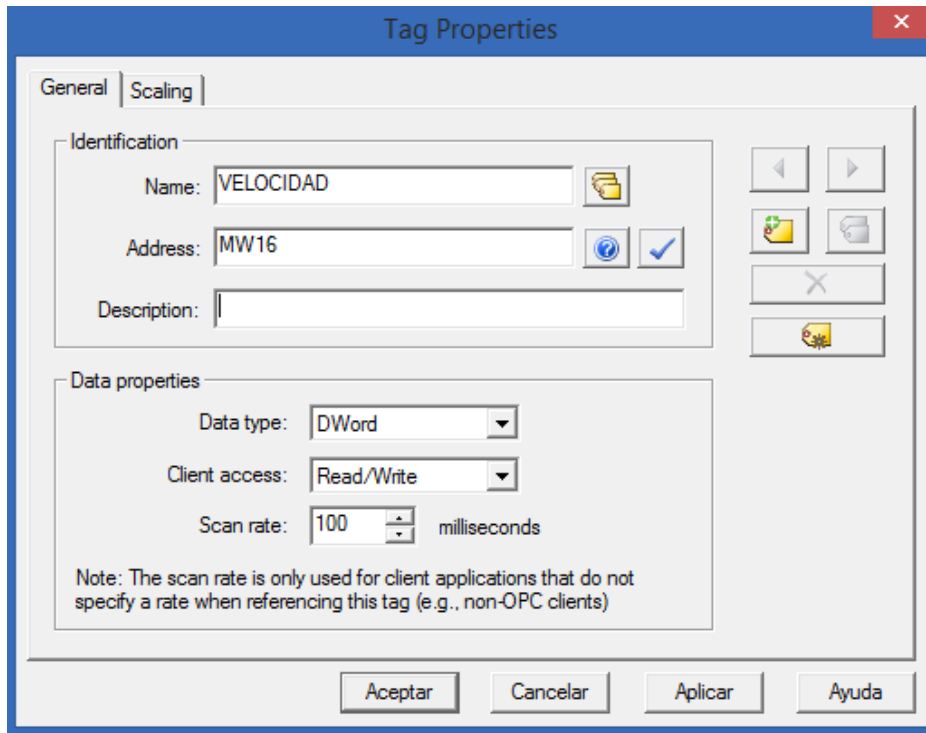


Figura 18-4 Creación de los Tags

Fuente: Autores.

Este procedimiento se realizará para los diferentes enlaces que se requieran para el proceso, una vez culminado con la creación de los Tags obtendremos un listado de los mismos.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
alta_presion	Q0.3	Boolean	100	None	
altura_agua	MW92	Word	100	None	
baja_presion	Q0.4	Boolean	100	None	
bomba	Q0.0	Boolean	100	None	
caudal_l_tmin_decimal	MD108	DWord	100	None	
caudal_l_tmin_entero	MD104	DWord	100	None	
consumo_decimal	MD124	DWord	100	None	
consumo_entero	MD120	DWord	100	None	
ON_OFF_OPC	M10.0	Boolean	100	None	
sp_q_decimal	MD116	DWord	100	None	
sp_q_entero	MD112	DWord	100	None	
VELOCIDAD	MW16	Word	100	None	
VELOCIDAD_HZ_OPC	MD20	DWord	100	None	

Figura 19-4 Listado de tags en NI OPC

Fuente: Autores.

Creada la lista completa de Tags se podrá comprobar que no exista ningún error vamos a la opción cliente rápido del OPC, esta opción nos indicara el estado *Good* cuando tiene el enlace correcto y *Bad* indicará el estado incorrecto una vez verificado si todo está correcto se procede a guardar.

Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_Rack	Byte	0	17:01:37.100	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_Stot	Byte	1	17:01:38.090	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_alta_presion	Boolean	0	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_altura_agua	Word	2	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_baja_presion	Boolean	1	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_bomba	Boolean	0	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_caudal_l_tmin_decimal	DWord	69	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_caudal_l_tmin_entero	DWord	1	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_consumo_decimal	DWord	54	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_consumo_entero	DWord	0	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_ON_OFF_OPC	Boolean	0	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_sq_d_decimal	DWord	0	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_sq_d_entero	DWord	10	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_VELOCIDAD	Word	18	17:01:37.387	Good	1
DATOS PRUEBAS-BALAREZO-GUANO_VELOCIDAD_HZ_OPC	DWord	0	17:01:37.387	Good	1

Figura 20-4 Verificación del estado del Quick client

Fuente: Autores.

4.3 Programación del sistema en LabVIEW.

4.3.1 Configuración del sistema de adquisición de datos. Para la adquisición de datos del sistema, se cuenta con un caudalímetro YF-S201 que será conectado a la USB DAQ 6009 que se utiliza como dispositivo de adquisición de datos, para ello se realizó una programación gráfica en el programa LabVIEW.



Figura 21-4 DAQ assistant 6009

Fuente: Autores.

Para la programación se utilizó una DAQ assistant que fue configurado para la adquisición de datos del caudalímetro.



Figura 22-4 Bloque de adquisición de datos DAQ de LabVIEW.

Fuente: Autores.

A continuación, se detalla la configuración de la DAQ assistant 6009.

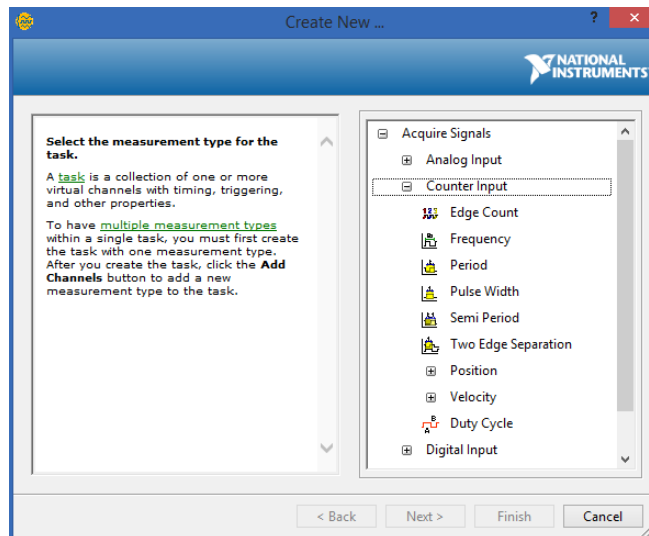


Figura 23-4 Configuración del dato para la adquisición DAQ Assistant.
Fuente: Autores.

Se configura la adquisición de valores digitales a una entrada de contador de la DAQ 6009, dicha lectura tiene rangos de 0 a 5 voltios.

Para lo cual se procedió a seleccionar “Counter input” debido a que nuestro sistema requiere realizar conteos de pulsos que envía el caudalímetro, a continuación, se selecciona “Edge count” que nos facilitará el conteo de pulsos por litro. Para finalizar se debe seleccionar el canal que se va a ocupar en la DAQ 6009.

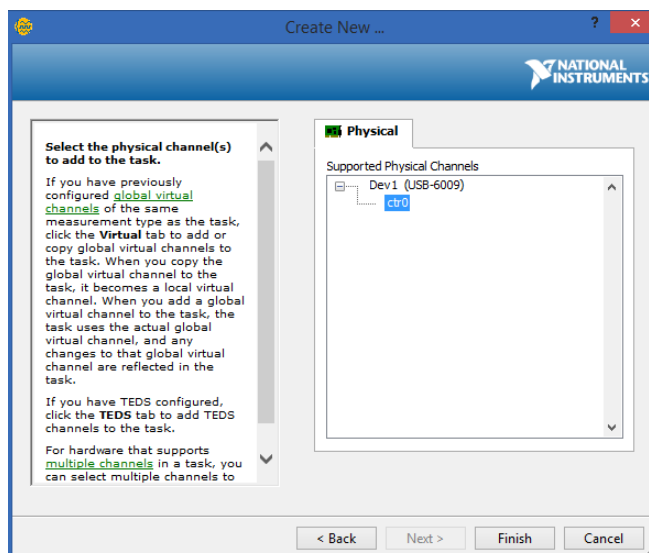


Figura 24-4 Selección de la entrada del contador
Fuente: Autores.

Se Debe configurar el rango de la señal de entrada respectivo de 0 a 5 voltios como máximo, para una mejor adquisición de datos.

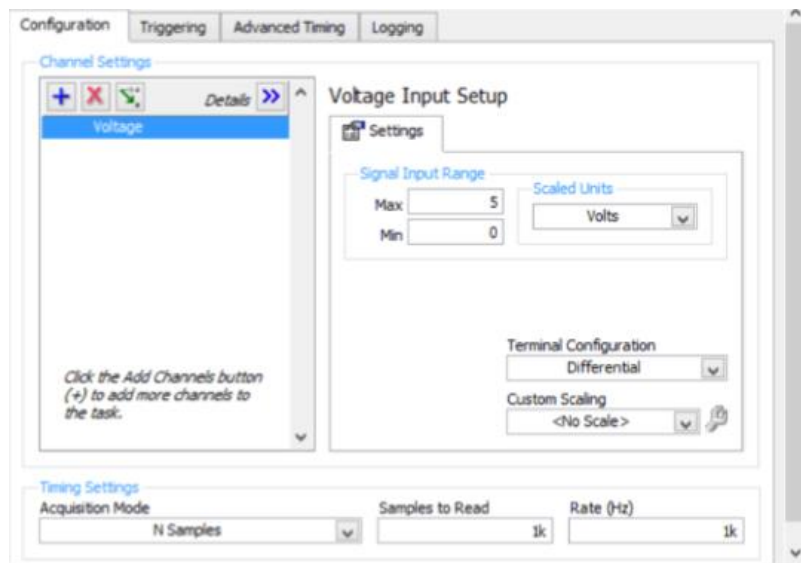


Figura 25-4 Configuración del canal rango de operación
Fuente: Autores.

Posteriormente, se procede a realizar la programación en LabVIEW para la adquisición de datos del sistema, para ello se utilizó el *timed loop*, la DAQ assistant, los diferentes tipos de operaciones matemáticas, los bloques de programación para el control de la planta, para el almacenamiento de los datos se utilizó el programa Excel.

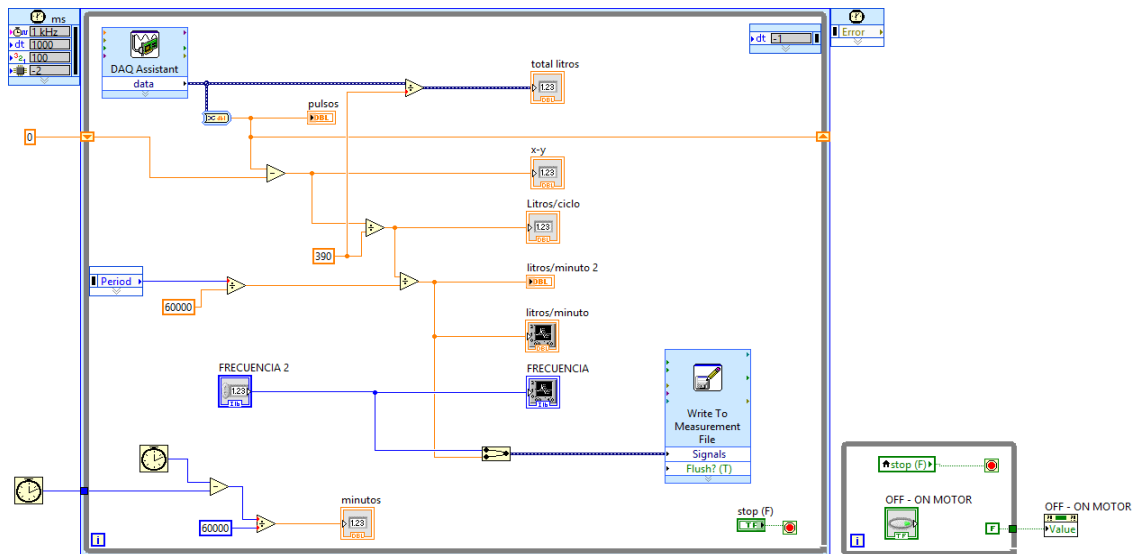


Figura 26-4 Bloque de programas en LabVIEW
Fuente: Autores.

En base a experimentos realizados se selecciona un rango de trabajo que fue de 0 – 60 Hz de frecuencia en el variador, para la toma de datos se trabajó con una frecuencia de 20 Hz para poder obtener los pulsos por cada litro del sistema (véase en el **ANEXO A**).

Una vez obtenido los datos de los pulsos por cada litro se procedió a realizar la parametrización del *set point*, inicialmente se ingresaba el valor de la frecuencia y se obtenía un caudal de salida determinado, mediante la parametrización se sustituyó el valor de frecuencia por el valor del caudal para así poder controlar el caudal de entrada que es el *set point* y el caudal de salida del sistema.

Para la realización de la parametrización se procedió a la toma de datos y a su vez se procedió al cálculo para obtener la ecuación de mayor aproximación al comportamiento del sistema.

Luego se procedió a seleccionar los datos de diferentes frecuencias con mayor estabilidad de caudal de salida del sistema, para posteriormente realizar las gráficas para determinar el menor error del sistema mediante la ecuación obtenida (Véase en el ANEXO B).

Luego se procedió a agregar la ecuación en el programa realizado en LabVIEW para poder enviar un caudal del set point y nos dé un caudal de salida en el sistema como se muestra en la Figura 27-4.

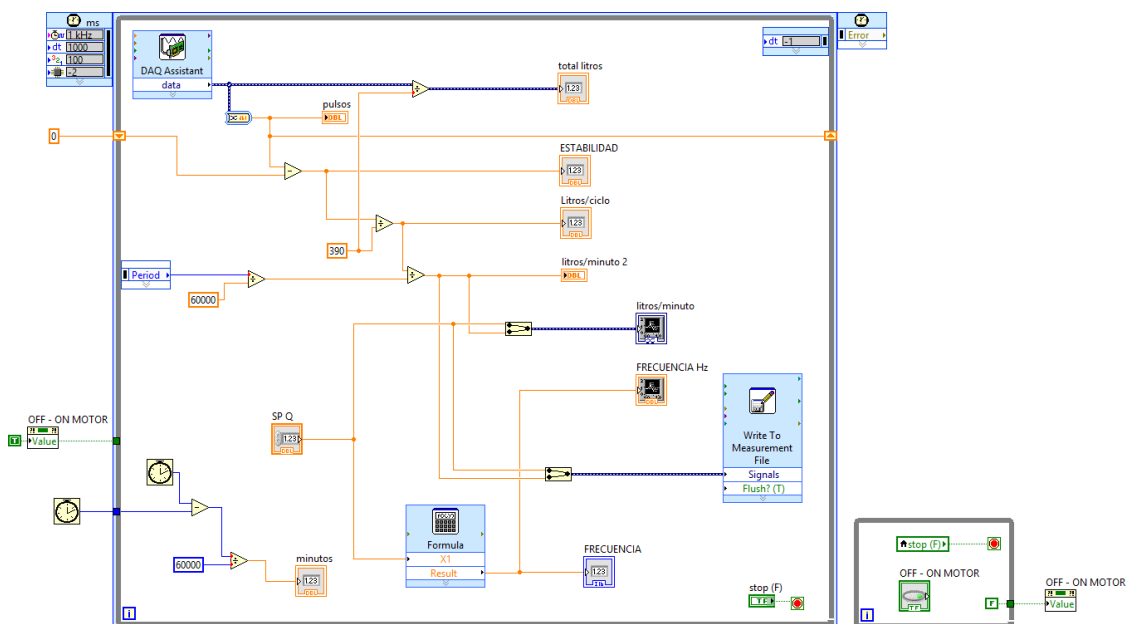


Figura 27-4 Bloque de programas LabVIEW

Fuente: Autores.

La ecuación que se agregó al bloque de la fórmula es la siguiente.

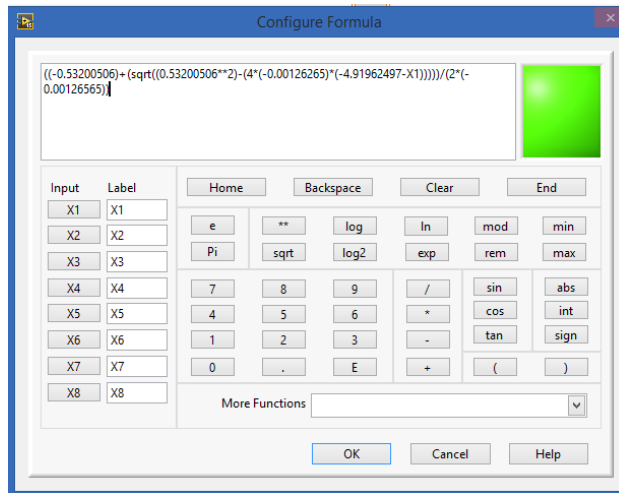


Figura 28-4 Configuración de la formula
Fuente: Autores.

4.4 Modelado del sistema de control de caudal (Herramienta Ident de Matlab).

En esta sección se realiza el modelado del sistema desde Matlab a partir de los datos adquiridos mediante la tarjeta DAQ USB 6009.

Ingresamos en el *IDENT* de MATLABR2015b a través del *Command Window*

>>ident

Posteriormente de haber ingresado el comando se nos va a abrir la siguiente ventana:

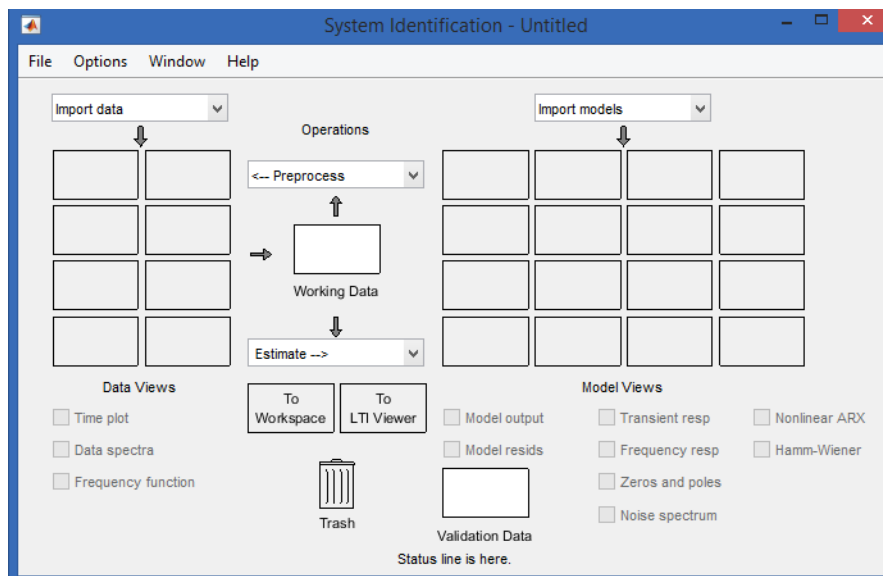


Figura 29-4 Sistema de identificación Matlab
Fuente: Autores.

Aquí seleccionamos los datos que vamos a cargar que fueron adquiridos a través de LabVIEW y guardados en el programa Excel, en este caso lo realizaremos en el dominio de tiempo.

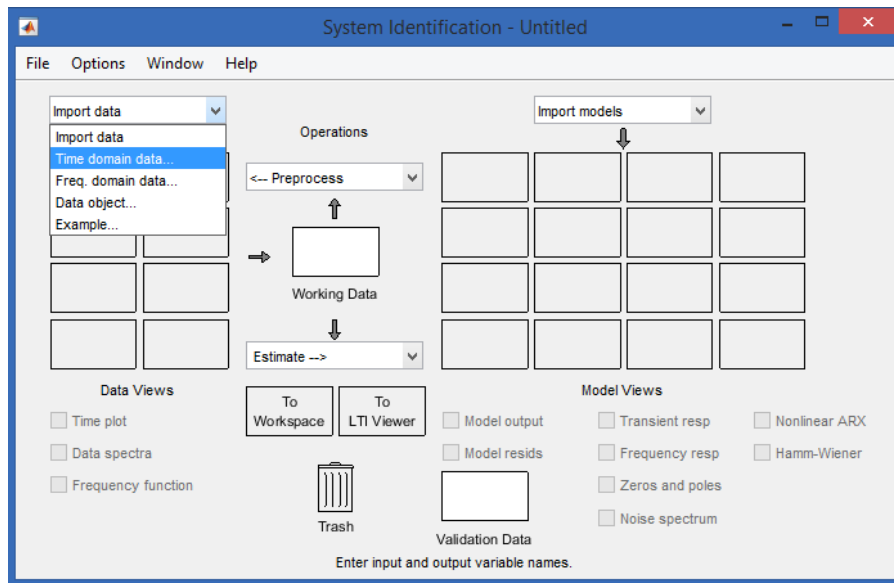


Figura 30-4 Sistema de identificación Matlab
Fuente: Autores.

Luego se abre una ventana en donde se ingresa el nombre de la matriz de datos que fueron cargados previamente en *Workspace* del MATLABR2015b, en la ventana se muestra varias opciones, primero tenemos *Data Format for Signals* en la que se debe colocar el *Time-Domain Signals* debido a que las muestras están en el dominio del tiempo, en el siguiente campo se pone la matriz de datos que ingresa del sistema en este caso $Q_{entrada}$, en la otra opción se debe poner los datos que fueron adquiridos con el LabVIEW como es Q_{salida} . La sección *Data Information* es llenado con un nombre de datos caudal, a continuación, se solicita el (*starting time*) que es igual a cero debido a que la toma de datos se lo realiza desde que corre el programa, por último, se coloca el (*Sampling Interval*) de 1 el cual corresponde al tiempo de muestreo del sistema.

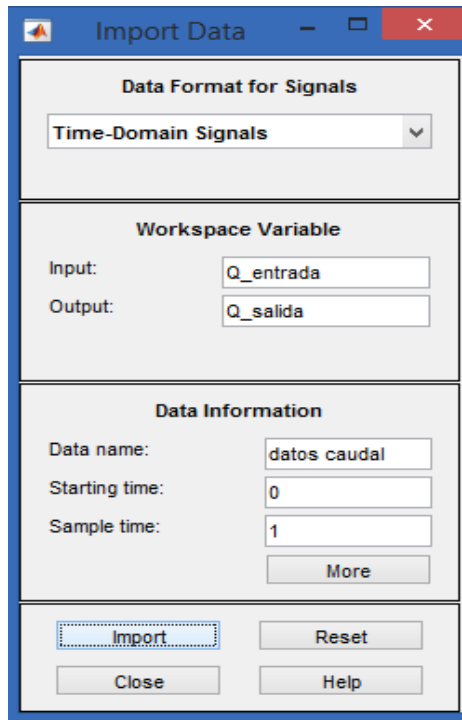


Figura 31-4 Formato de datos para señales en el dominio de tiempo.
Fuente: Autores.

Al exportar los datos se visualizarán en la herramienta Ident los datos importados y su respectivo ploteo tal como se muestra en la Figura 32-4.

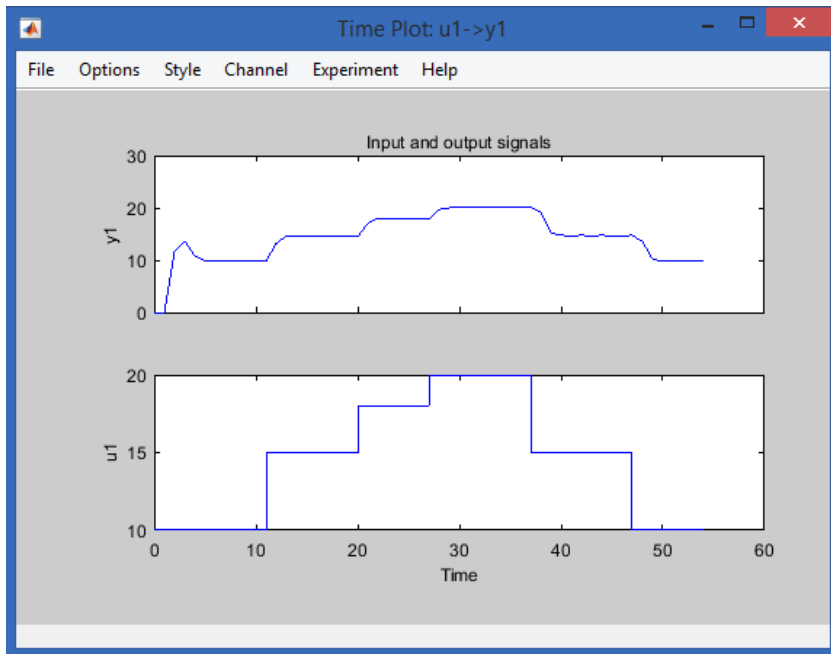
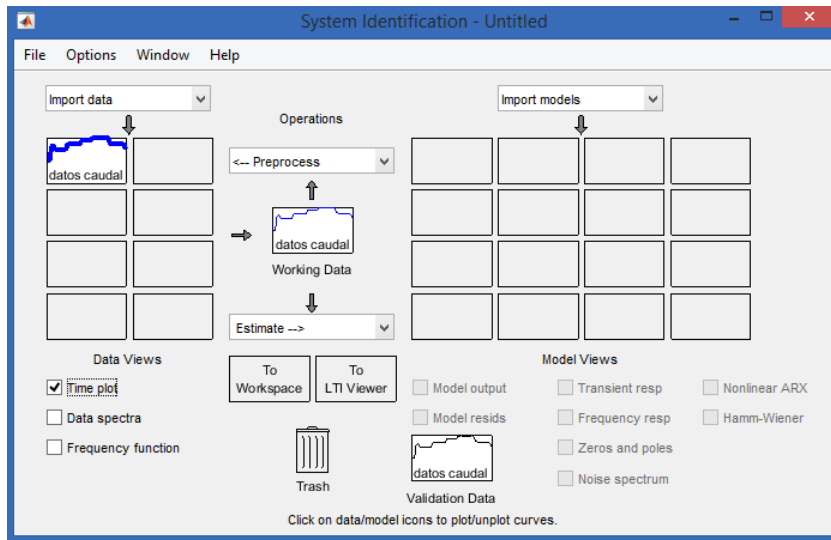


Figura 32-4 Herramienta de identificación (Ident de Matlab)
Fuente: Autores.

Luego se procederá a obtener la función de transferencia del sistema se selecciona la opción *Transfer Function Models* alojada en el menú “*Estimate*” como se indica a continuación.

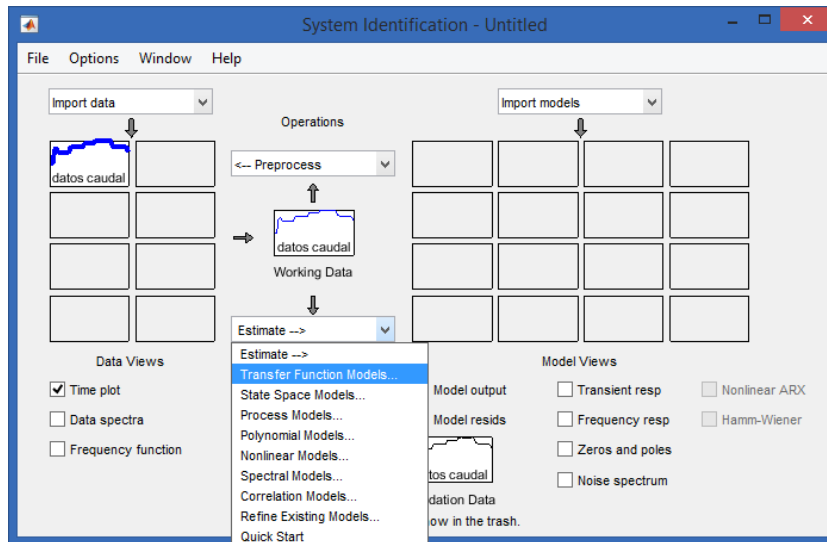


Figura 33-4 Modelo del proceso

Fuente: Autores.

Se nos abre la siguiente ventana en el cual se puede especificar el número de polos y ceros que tendrá la función de transferencia que represente al sistema. Las configuraciones deben ser modificadas para tener un mayor porcentaje de exactitud como se muestra en la Figura 34-4.

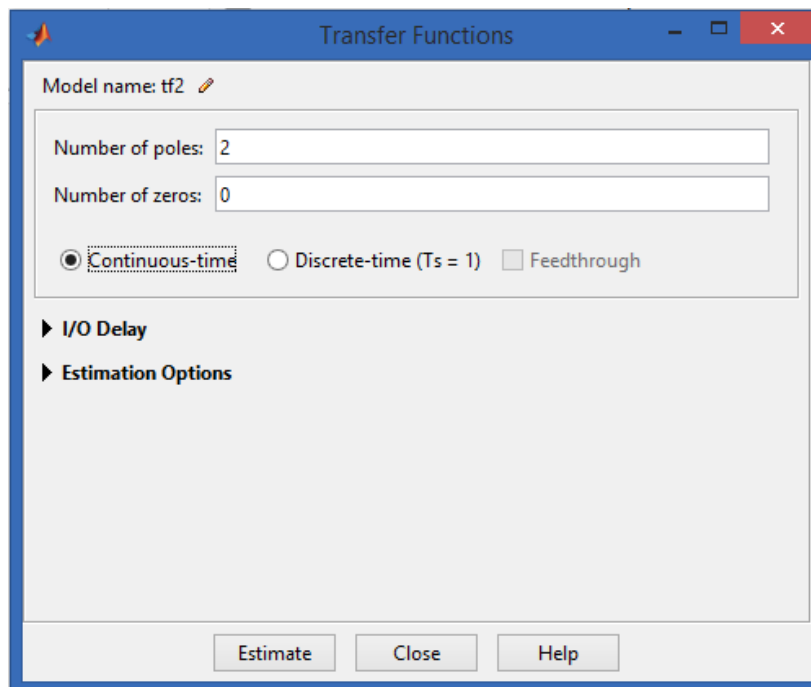


Figura 34-4 Selección del número de polos y ceros para la función de transferencia del sistema.

Fuente: Autores

Ingresamos los parámetros necesarios, comenzamos con 2, 3, 4 polos y sin ningún cero, para obtener la función, y continuamente seguimos realizando un análisis con funciones de un cero, dos, para elegir el más adecuado para nuestro análisis.

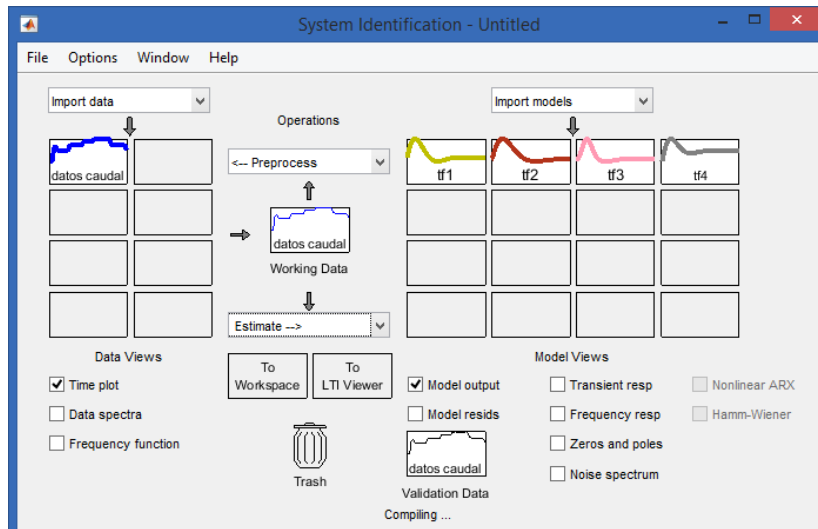


Figura 35-4 Generación de los modelos del sistema en Ident de Matlab.
Fuente: Autores.

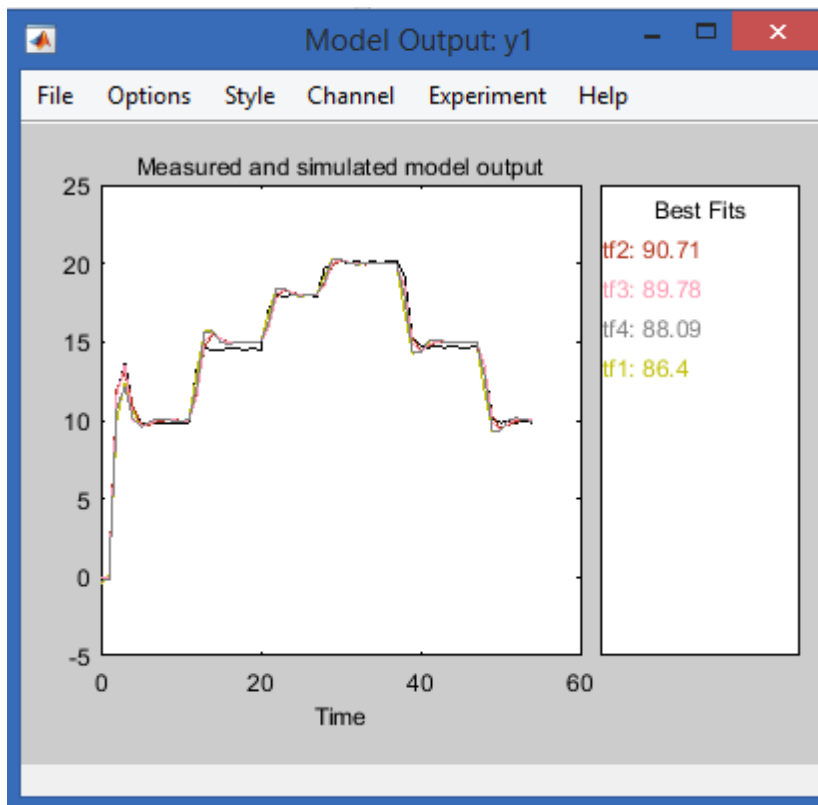


Figura 36-4 Curvas y porcentaje de estimación de la función de transferencia.
Fuente: Autores.

Para nuestro sistema podemos observar los siguientes datos obtenidos los mismos que fueron analizados detenidamente.

En este caso tomamos la mejor aproximación que se ha obtenido, existiendo dos resultados que coinciden siendo de dos polos y un cero, dos polos y sin ceros, tomaremos el que tiene dos polos y sin ceros por la facilidad del desarrollo del controlador.

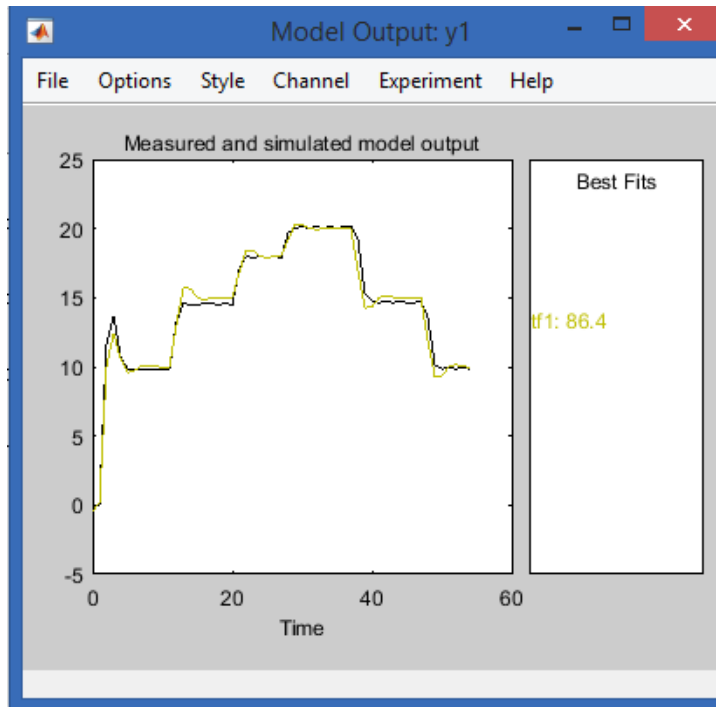


Figura 37-4 Curva y porcentaje de estimación de la función de transferencia.
Fuente: Autores.

Al dar doble clic sobre el recuadro del modelo escogido como el adecuado se abrirá la ventana en donde se detallan las características del modelo seleccionado y se obtiene la función de transferencia del sistema.

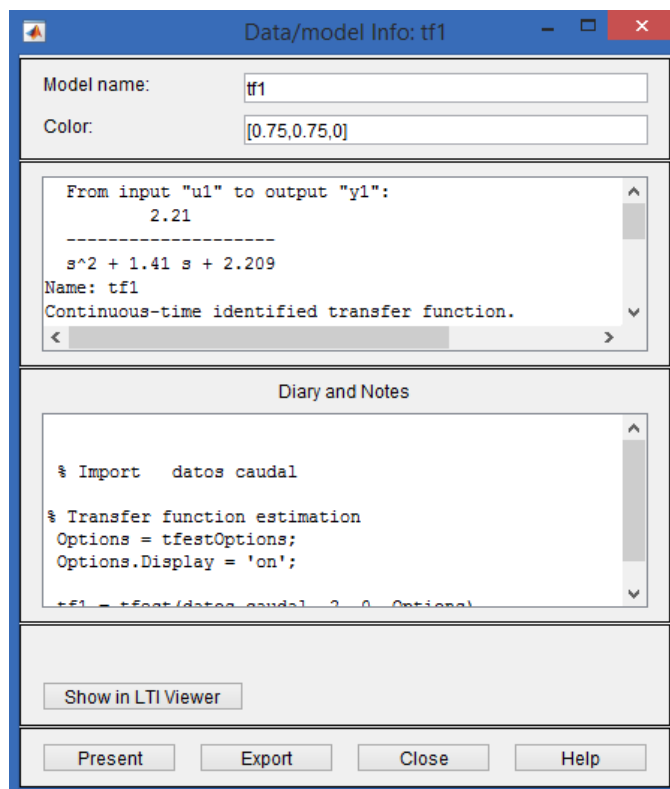


Figura 38-4 Resultado del modelo identificado en Ident de Matlab.
Fuente: Autores.

Para comprobar la función de transferencia obtenida se modela el sistema en la herramienta simulink de MATLAB.

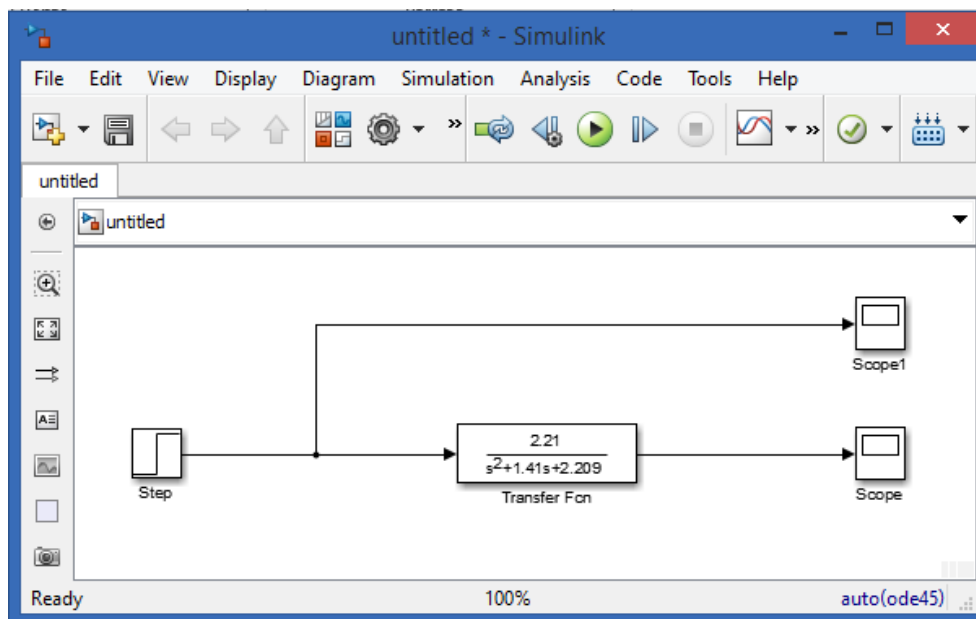


Figura 39-4 Diseño del sistema en Simulink de Matlab
Fuente: Autores.

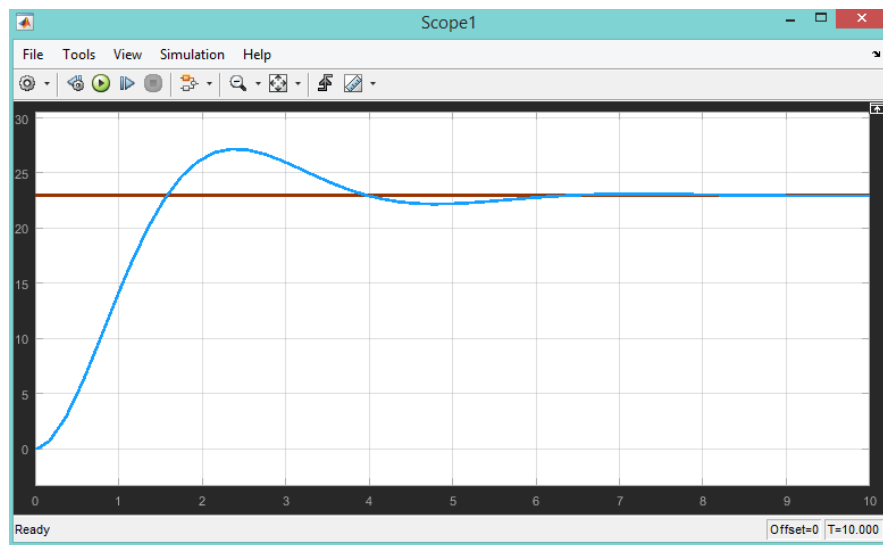


Figura 40-4 Simulink de Matlab
Fuente: Autores.

De acuerdo a la función de transferencia obtenida se procede a implementar en simulink el diagrama respectivo PID como se muestra en la figura 41-4.

Se empezará por proceder a PID Tuner para que el programa encuentre los parámetros ideales.

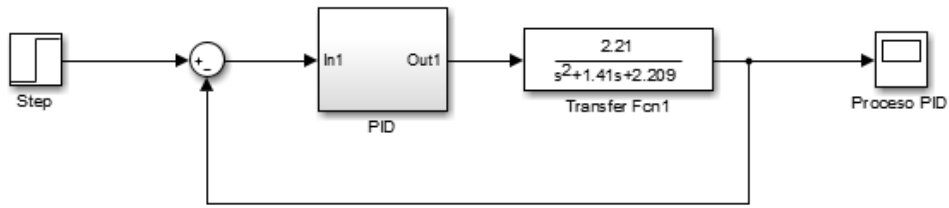


Figura 41-4 Diseño en simulink del controlador PID
Fuente: Autores.

Posteriormente nos mostrará los parámetros respectivos del controlador Proporcional, Integral, Derivativo, tal como se muestra en la figura 42-4.

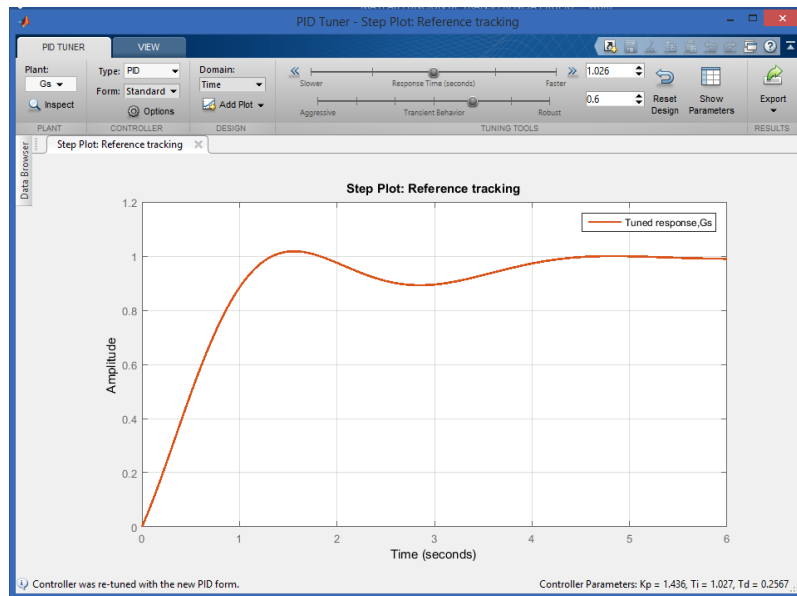


Figura 42-4 PID Tuner
Fuente: Autores.

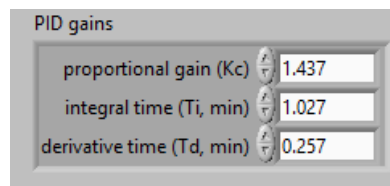


Figura 43-4 Valores de ganancias
Fuente: Autores.

4.5 Implementación del controlador PID

La implementación se desarrolla en LabVIEW debido a que realiza todo el proceso matemático para el control de las variables de salida mediante un bloque PID.

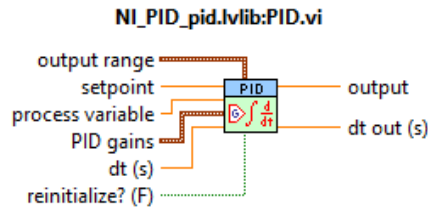


Figura 44-4 Estructura del PID en LabVIEW
Fuente: Autores.

A continuación, describiremos el procedimiento paso a paso el proceso de control del caudal de agua. Se procede a agregar el bloque PID que consta de variables que necesitan ser parametrizados como el *Output Range*, especifica el rango superior e inferior de la salida del bloque; Set point, variable a la cual se desea llegar con la estabilidad; *Process variable*, es la medición actual la cual será la retroalimentación de la planta; *PID gains*, son los valores proporcional, integral y derivativo los cuales permite una respuesta más rápida y estable del sistema; Output, es la variable de salida que controla el caudal final de la planta.

En la Figura 45-4 se muestra los bloques de control los cuales permiten la lectura optima mediante el encoder, obteniendo el caudal actual de la planta, dichos valores son obtenidos por la DAQ 6009 el cual nos dará los pulsos pertinentes para obtener el caudal adecuado para el control.

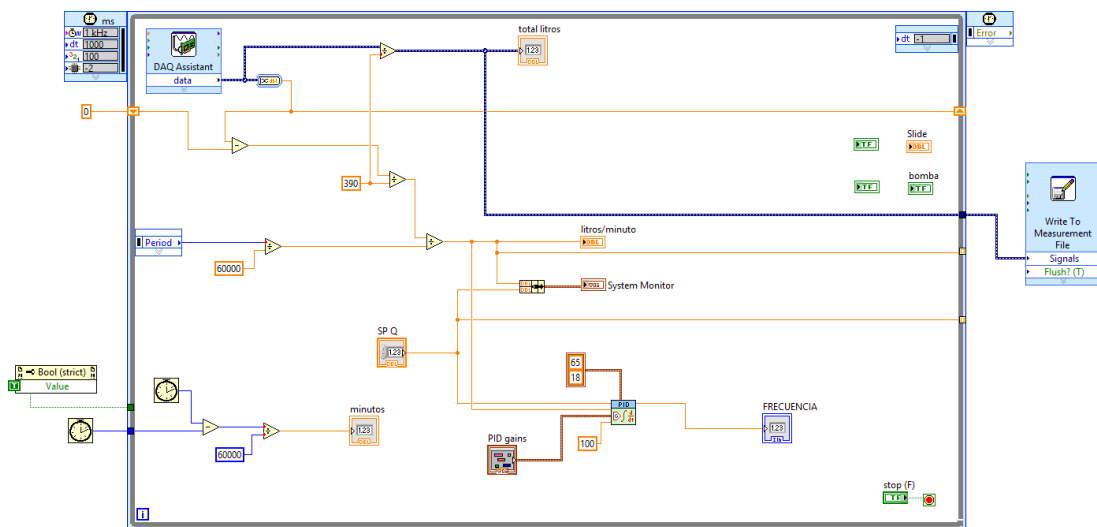


Figura 45-4 Bloque de programación PID de LabVIEW.
Fuente: Autores.

Se muestra el diseño final del controlador PID que se ha diseñado donde el usuario podrá controlar, monitorear de forma eficiente los parámetros como el set point del control PID y el encendido y apagado del sistema

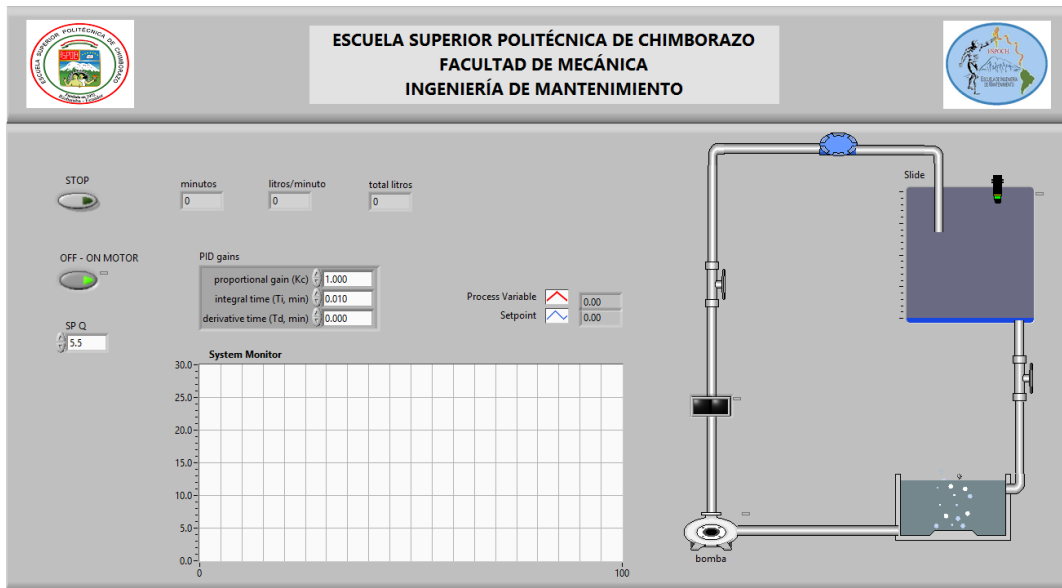


Figura 46-4 Panel Frontal LabVIEW

Fuente: Autores.

Para garantizar que el diseño cumple con las condiciones propuestas, es necesario utilizar la interfaz de adquisición de datos en tiempo real, para la misma se utilizó la tarjeta DAQ USB 6009.

4.6 Análisis de los diferentes tipos de controladores P, PI, PD, PID.

A continuación, se presentan las gráficas generadas en MATLAB del comportamiento de los controladores P, PI, PD y PID para una entrada de caudal de 22.95 litros/minutos.

4.6.1 Control Proporcional (P).

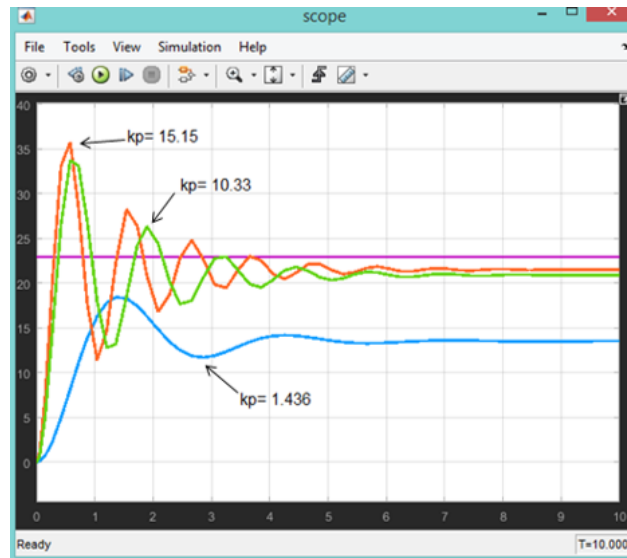


Figura 47-4 Simulink de Matlab control P
Fuente: Autores.

Notamos en la Figura 47-4 que el error estacionario con $k_p = 1.4368$ es considerable y se reduce con el aumento en la constante proporcional, pero si llega a tener estabilidad.

Observamos que el regulador P, proporciona una respuesta de corrección rápida al cambio de entrada, pero nunca corrige el error estacionario, además produce un sobre paso inicial muy alto.

4.6.2 Control proporcional-integral (PI).

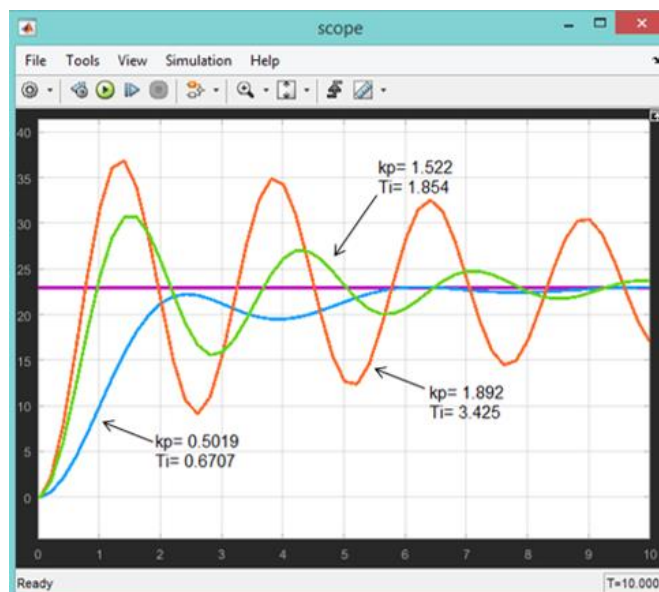


Figura 48-4 Simulink de Matlab control PI
Fuente: Autores.

En la Figura 48-4 muestra las diferentes acciones de corrección ocurridas con el aumento de la acción integral, las mismas que al incrementar el sobre paso inicial llegan a valores que pueden volver inestables el sistema, como en este caso, con una constante de integración con valor de $T_i=3.425$, aunque con una sintonía adecuada se pueden obtener buenas características de respuesta.

4.6.3 Control Proporcional-Derivativo (PD)

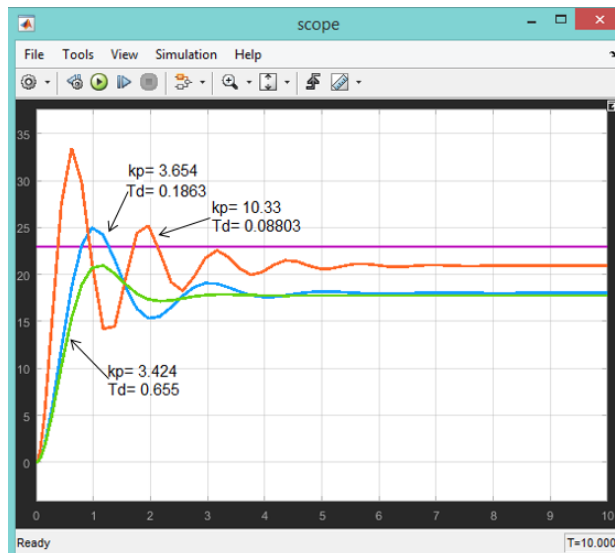


Figura 49-4 Control PD Simulink de Matlab
Fuente: Autores.

En la Figura 49-4 se verifica que reduce notablemente el sobre paso inicial, y se consigue buenas características de respuesta, pero se sigue teniendo problemas de error en el estado estacionario, a medida que se va incrementando la acción derivativa produce una respuesta muy lenta del sistema la cual no se desea en procesos o sistemas de control.

4.6.4 Comportamiento de los diferentes controladores

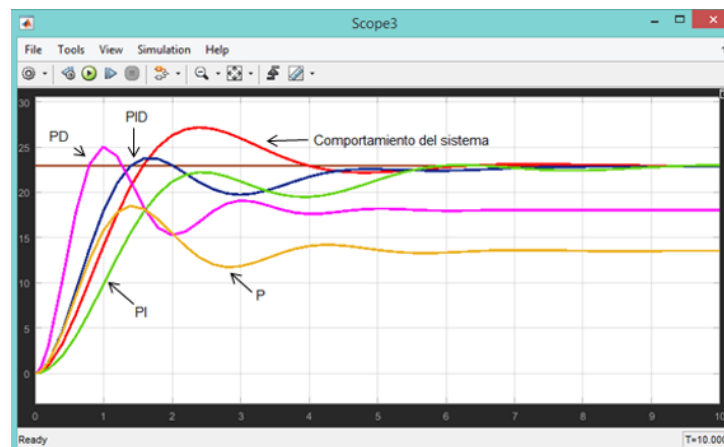


Figura 50-4 Simulink de Matlab
Fuente: Autores.

Vemos en la Figura 50-4 el comportamiento de cada controlador conseguido con las constantes obtenidas en PID Tuner de Matlab. La respuesta con mejor característica de estabilidad es el control PID en este caso, ya que el control PD no es prácticamente realizable, en la práctica se suelen utilizar los controladores P, PI y PID.

Para este tipo de proceso el controlador PID, es bastante bueno para equilibrar el tiempo de respuesta, corrección de error en estado estacionario y un aceptable grado de sobre paso inicial, por lo cual este controlador PID combina las buenas características de los diferentes controladores.

4.7 Pruebas de funcionamiento del sistema de control de caudal

Una vez finalizado el desarrollo de la programación de los respectivos programas, la configuración para la comunicación entre el variador de velocidad y el PLC a través del NI OPC server y la modificación para la visualización del sistema en la pantalla HMI, se procedió a verificar el estado de funcionamiento del sistema de la pantalla para comprobar el funcionamiento general del proceso sin ninguna anomalía de acuerdo a la programación realizada.

4.7.1 Pruebas realizadas con simulink/Matlab

Con las ganancias obtenidas mediante el PID Tuner se procedió a realizar el diagrama de bloques con la ayuda de las herramientas de simulink/Matlab el cual ayudó a simular el comportamiento del sistema, para ello se utilizó el bloque *pulse generator* el cual puede enviar señales escalares para especificar los parámetros de forma de onda.

En la Figura 51-4 se observa el comportamiento de los distintos controladores el cual nos permite corroborar que el controlador que mejor responde a las perturbaciones realizadas mediante la simulación es el controlador PID.



Figura 51-4 Comportamiento del sistema simulink/Matlab
Fuente: Autores.

4.7.2 Pruebas realizadas con el módulo de control de caudal

Se procedió a la puesta en marcha en el programa LabVIEW una vez encontrado las ganancias de los controladores P, PI, PD y PID para un sistema de control de caudal, iniciamos ingresando los valores del controlador Proporcional, para observar el comportamiento del sistema.

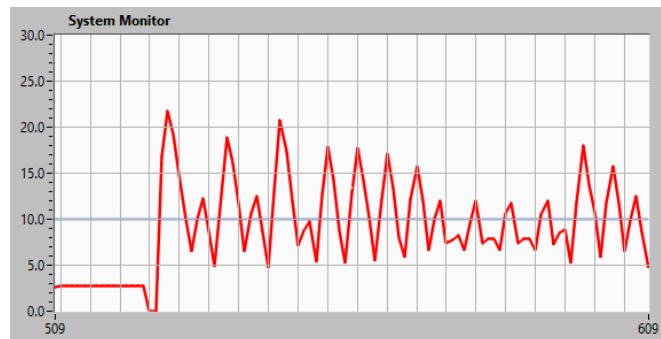


Figura 52-4 Comportamiento del controlador P
Fuente: Autores.

Como se observa en la Figura 52-4 al ingresar las ganancias del controlador P con $K_p = 10.33$ el sistema no llega a estabilizarse y tiene una oscilación permanente en el sistema por tanto este controlador no es recomendable para este proceso.

Posteriormente se realizó las pruebas del controlador Proporcional-Integral, ingresamos las ganancias del controlador con $K_p = 1.892$ y $T_i = 3.425$ para observar el comportamiento en el sistema como se observa en la Figura 53-4.

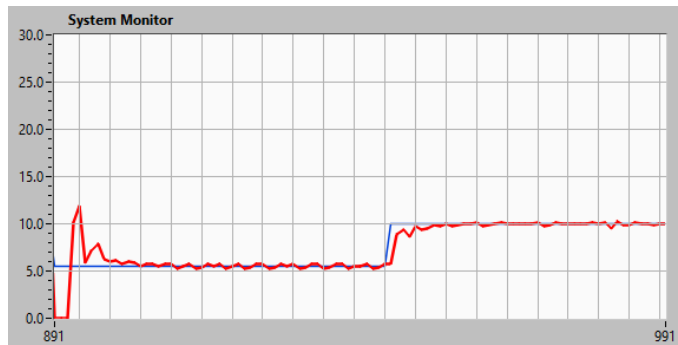


Figura 53-4 Comportamiento del controlador PI
Fuente: Autores.

Una vez ingresado los valores se observa que el sistema llega a estabilizarse en un tiempo de 13 segundos, la línea de color azul es el set point y la línea roja es la variable del proceso, por tanto, este tipo de control se puede utilizar en este sistema de control de caudal, con la única observación que se busca mejorar el tiempo de respuesta para el proceso.

También se realizó las pruebas del controlador Proporcional-Derivativo con ganancias de $K_p = 10.36$ y $T_d = 0.088$ como se aprecia en la Figura 54-4 la línea roja es la variable del proceso la cual está por debajo del set point el sistema llega a estabilizarse, pero no entrega el caudal necesario al sistema.

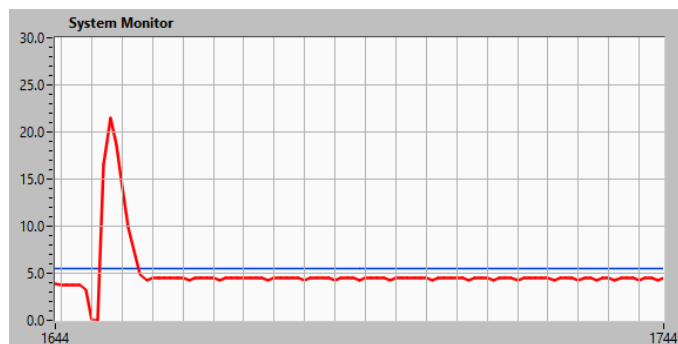


Figura 54-4 Comportamiento del controlador PD
Fuente: Autores.

Como último se realizó las pruebas con el controlador Proporcional-Integral-Derivativo con $K_p = 1.437$, $T_i = 1.027$ y $T_d = 0.257$ para observar el comportamiento del sistema de control de caudal.

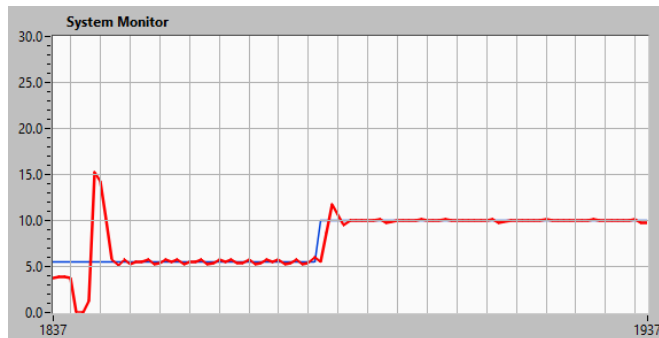


Figura 55-4 Comportamiento del controlador PID

Fuente: Autores.

Como se observa en la Figura 55-4 el sistema responde al set point y llega a estabilizarse en un tiempo de 6 segundos, una vez encontrado el controlador más adecuado para este sistema se procedió a realizar perturbaciones por medio de la válvula de globo abriendo y cerrando momentáneamente así logrando verificar que el controlador responde al set point correctamente como se observa en la Figura 56-4.



Figura 56-4 Comportamiento del controlador PID a perturbaciones

Fuente: Autores.

Para verificar si el enlace entre los dispositivos de control del sistema con la HMI era el correcto, se puso en marcha, en la cual se pudo observar que los valores de la pantalla HMI y los de LabVIEW son los mismos lo cual nos indica que el funcionamiento es correcto y no presenta ningún problema.

Además, la puesta en marcha del sistema SCADA que se programó en LabVIEW, se pudo observar el correcto funcionamiento de la transferencia de información con la HMI, con la ayuda del NI OPC server de LabVIEW.

Del mismo modo se procedió a las pruebas de funcionamiento tanto del control manual y automático del sistema desde el HMI, con lo que se verificó el correcto funcionamiento de la programación y el exitoso enlace entre los programas con la ayuda del NI OPC server.



Figura 57-4 Pantalla HMI
Fuente: Autores.

CAPÍTULO V

5. MANUAL DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS

5.1 Plan de seguridad de los equipos que conforman el módulo de control de caudal de agua

La realización de este plan es de mucha importancia para proteger la integridad de los estudiantes en la ejecución de sus prácticas y de la misma manera proteger a los equipos para ello se localizará los puntos críticos de cada uno de los equipos y elementos existentes en el módulo.

Punto crítico se considera aquellos elementos que estén expuestos a movimientos y a las conexiones que circule corriente eléctrica y estén expuestas a la fácil manipulación por parte de los estudiantes ver **ANEXO C**.

5.2 Plan de mantenimiento de los equipos que conforman el módulo de control de caudal.

El tipo de mantenimiento que se realizará a los equipos del módulo del control PID será un mantenimiento predictivo, este trata una serie de acciones para evitar y disminuir las posibles fallas imprevistas en los equipos mediante acciones periódicas ya que cuenta con tareas preventivas tales como son las inspecciones, limpieza, calibración y cambio de piezas desgastadas entre otras con la finalidad de alcanzar la vida útil de los equipos e incrementar su fiabilidad.

Para la ejecución del plan de mantenimiento es muy importante tener en cuenta los manuales de los fabricantes de los equipos que se encuentran en el módulo para tomar en cuenta las debidas indicaciones y recomendaciones en estos documentos nos dará una guía para el buen funcionamiento de su equipo respectivo.

El adecuado mantenimiento para el banco de pruebas de control de caudal es de la persona que esté a cargo del laboratorio y de los estudiantes que realice la práctica dentro del mismo además que se les proporcionarán las distintas guías y manuales para cada uno de los componentes.

5.2.1 *Sistema de codificación.* Es de gran importancia el sistema de codificación para el reconocimiento del equipo y el respectivo control de una manera ordenada del módulo del control

de caudal; existe una normativa estandarizada para la codificación que a continuación se detalla y el significado de cada sigla:

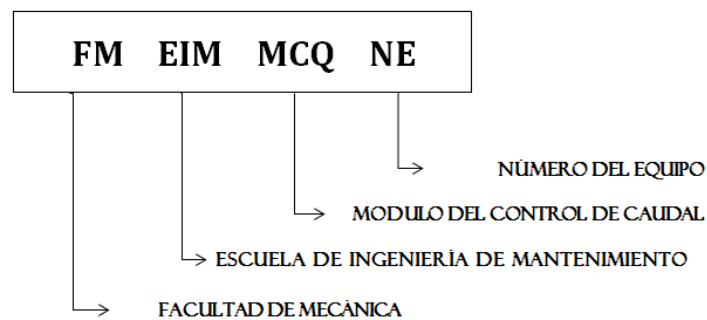


Figura 1-5 Codificación de equipos
Fuente: Autores.

Tabla 1-5. Codificación de equipos

Nº	Equipo	Codificación
1	Moto Bomba centrífuga WEG 1/2 HP	FM-EIM-MCQ-01
2	Variador de Frecuencia VLT Micro Drive FC 51	FM-EIM-MCQ-02
3	PLC S7 - 1200. CPU 1214	FM-EIM-MCQ-03
4	Pantalla KTP 600 color PN	FM-EIM-MCQ-04
5	Sensor de flujo YF-S201 (Caudalímetro)	FM-EIM-MCQ-05

Fuente: Autores.

La tabla indica la descripción y numeración de los equipos con su respectiva codificación para su respectiva recolección de datos y la planificación de cada una de sus tareas y ordenes de trabajo.

5.2.2 Banco de tareas. Los equipos que fueron codificados anteriormente cada uno de ellos constará con un banco de tareas y en ellos se detalla las actividades de mantenimiento correspondientes a cada equipo y así obtener un óptimo funcionamiento del equipo. Además, que el banco de tareas cuenta con las siguientes características:

- Nombre del equipo con sus respectivas características
- La codificación antes asignada
- Foto del equipo
- Herramientas y materiales que se utilizaran en las respectivas actividades
- Procedimiento de las actividades a realizar
- Observaciones de las actividades con el propósito de seguir mejorando

Esta información detallada la encontramos en el **ANEXO D**.

5.2.3 *Agenda de actividades de mantenimiento.* Los programas de mantenimiento son documentos que se encarga de los cronogramas para detallar las frecuencias con la que se debe realizar las tareas de mantenimiento diarias, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales, etc. Cabe recalcar que para la realización de estas actividades es muy importante tomar en cuenta las especificaciones y recomendaciones del fabricante.

Se debe considerar que el sistema o equipo se encuentre en su normal funcionamiento para de esta manera poder ejecutar este programa de mantenimiento que se especifica en el **ANEXO E**.

5.2.4 *Plan de mantenimiento de los equipos*

Elaborar un plan de mantenimiento completo que facilite al operario a llevar un control permanente y adecuado de todos los componentes del módulo de control PID, que servirá de manera correcta para ejecutar en los momentos de realizar mantenimiento de los equipos.

Anteriormente se realizó las actividades a desarrollarse vamos a elaborar el plan de mantenimiento completo del módulo de control PID siguiendo las recomendaciones de los fabricantes, de tal manera se minimizará los daños en el proceso ver **ANEXO F**.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se implementó un módulo para el control y monitoreo de caudal de agua mediante un controlador PID, y demuestra que es confiable y seguro para su operación al contar con un sensor ultrasónico el cual evitara el desbordamiento del fluido y evitar daños a los diferentes equipos que se encuentran instalados en el módulo ubicado en el Laboratorio de Automatización Industrial de la Facultad de Mecánica.

Se programó satisfactoriamente el PLC S7 1200 con la utilización del programa Tia Portal V13 y el lenguaje de programación KOP, se consiguió la comunicación entre el variador de velocidad y la motobomba centrífuga para lograr regular la velocidad de la bomba. También se comunicó los dispositivos con la programación desarrollada en LabVIEW mediante un enlace realizado con el NI OPC server.

El paquete de software Matlab, con sus diferentes herramientas especializadas nos ayudó a la obtención de la función de transferencia a partir de la adquisición de datos, a realizar simulaciones de los diferentes controladores mediante la herramienta simulink que nos muestra el comportamiento con relativa facilidad y rapidez.

Después de analizar los diferentes tipos de controladores P, PI, PD y PID mediante el programa simulink de Matlab en relación al modelamiento del sistema de control, se concluye que el control que mejor funciona en la práctica es el controlador PID por su estabilidad y robustez ante perturbaciones.

Se realizó la programación mediante instrumentos virtuales de LabVIEW cumpliendo las expectativas de simulación en relación al control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), cuyo objetivo es entregar una respuesta siempre acorde a lo que necesita.

6.2 Recomendaciones

Al crear los tags en un canal de NI OPC server y los controles en LabVIEW no olvidar seleccionar un estado de lectura o escritura para que cumpla su respectiva función.

Las ganancias del PID deben ser ingresados en base a los resultados deseados, es decir, poner los valores, verificar los resultados obtenidos e irlos modificando para mejorar las curvas.

Al momento de realizar el encendido de la bomba se recomienda iniciar un arranque con rampa para eliminar el sobre pico que produce por la inercia de la bomba.

Ejecutar de forma correcta las técnicas de seguridad y el plan de mantenimiento antes y después de la puesta en marcha el módulo de caudal de agua de esta manera mantener los equipos en óptimas condiciones y cumplan su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

ASTROM, Karl y HAGGLUND, Tore. 2009. *Control PID Avansado*. Madrid : Pearson Educación S.A., 2009. págs. 67-72. 978-84-8322-511-0.

CARVAJAL, Lizandro y RICAUTE, Danny. 2012. *Diseño y Montaje de un módulo con PLC y pantalla táctil, para el control de nivel de fluidos para el Laboratorio de control Industrial de la Facultad de Mecánica*. RIOBAMBA : <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3070>, 2012. págs. 3-5. UDFM;25T00204.

CREUS, Antonio. 2010. *INSTRUMENTACION INDUSTRIAL*. Barcelona : Alfaomega grupo editor S.A., 2010. págs. 138-177; 381-388. 978-607-707-042-9.

GALVEZ, Paúl. 2014. *Componentes básicos de un PLC*. [En línea] 25 de Junio de 2014. [Citado el: 4 de Octubre de 2017.] <http://plcprofepaul.blogspot.com/>.

GALVEZ Paúl. 2011. *Servidores OPC*. [En línea] 2011. [Citado el: 19 de Octubre de 2017.] <http://profesorpaul.blogspot.com/p/servidores-opc.html>.

GARCIA, Eduardo. 2016. *Diseño e implementación de un sistema SCADA para las plantaciones de la Asociación de fruticultores de Ambato (ASOFRUT)*. RIOBAMBA : <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6029>, 2016. UDCTIPEC;20T00770.

KLUG, Dario. 2017. *Controlador PID*. [En línea] 2017. [Citado el: 18 de Octubre de 2017.] http://www.academia.edu/16511961/Controlador_PID.

MANDADO, Enrique. 2008. *AUTOMATAS PROGRAMABLES*. Madrid : Paraninfo S.A., 2008. págs. 371-402. 978-84-9732-328-4.

MathWorks. 2017. *MATLAB*. [En línea] 2017. [Citado el: 14 de Diciembre de 2017.] <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>.

MORENO, M. 2009. *Controlador Logico Programable (PLC)*. [En línea] 2009. [Citado el: 25 de Septiembre de 2017.]

<http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf>.

NATIONAL INSTRUMENT. 2014. *Empezando con LabVIEW*. [En línea] 2014. [Citado el: 7 de Noviembre de 2017.] http://www.ni.com/academic/learn_labview/esa/.

SALCEDO, Gino. 2005. *Descripción Técnica de los Sistemas De bombeo*. [En línea] 2005. [Citado el: 08 de Noviembre de 2017.] http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/salcedo_sg/cap03.pdf.

SIEMENS. 2011. *Kit de iniciacion SIMATIC S7-1200*. [En línea] 2011. [Citado el: 12 de Octubre de 2017.] <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200%20-%20Folleto0411.pdf>.

SIEMENS. 2015. *Controlador Programable S7-1200*. [En línea] 06 de 2015. [Citado el: 8 de Octubre de 2017.] https://cache.industry.siemens.com/dl/files/121/109478121/att_851434/v1/s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf.

SIEMENS. 2014. *PantallasSiemens*. [En línea] 2014. [Citado el: 17 de Octubre de 2017.] <http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/hmi/Pages/PantallasHMI.aspx>.

SIEMENS. 2012. *TIA Portal*. [En línea] 2012. [Citado el: 17 de Octubre de 2017.] http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/tia-portal/tia_portal/pages/tia-portal.aspx.

SIEMENS. 2009. *SIMATIC TIA Portal STEP 7 Basic V10.5*. [En línea] 2009. [Citado el: 17 de Octubre de 2017.] <https://es.slideshare.net/johnpir/manual-manejo-tia-portal-siemens>.

ANEXOS