

# Implementation of a cascade control strategy in the level module of a laboratory at the Ricardo Palma University

Bernardo Dimas Guerrero-Valenzuela, Bach, Pedro Huamani-Navarrete, Dr  
Ricardo Palma University, Peru, dguerrero@urp.edu.pe, phuamani@urp.edu.pe

*Abstract -- This paper presents the implementation of a cascade control strategy for the existing level control module in the Control Laboratory of the Faculty of Engineering, at the Ricardo Palma University. For this, a level transmitter and a flow transmitter are fitted, as well as a Simatic S7-1200 PLC with its respective analog input / output modules and an HMI screen. Subsequently, the STEP 7 BASIC V14 software was used for the scaling of the analog signals of the control loops of level (primary) and flow (secondary), and the programming and tuning of the controllers continued with the trial and error procedure, giving as best response a PI control for the primary loop, and a P control for the secondary. Likewise, the PLC Web server was programmed to allow a web browser of a computer or mobile device to allow the authorized user to access and monitor the process remotely.*

*Keywords-- PID cascade control, PLC S7 1200, HMI Screen, Software Step 7.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.294>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Implementación de una estrategia de control en cascada en el módulo de nivel de un laboratorio de la Universidad Ricardo Palma

Bernardo Dimas Guerrero-Valenzuela, Bach, Pedro Huamaní-Navarrete, Dr  
Ricardo Palma University, Peru, [dguerrero@urp.edu.pe](mailto:dguerrero@urp.edu.pe), [phuamani@urp.edu.pe](mailto:phuamani@urp.edu.pe)

*Abstract— en este trabajo se presenta la implementación de una estrategia de control en cascada en el módulo de control de nivel existente en el Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Ricardo Palma. Para ello, se acondicionaron los transmisores de nivel y de flujo, un PLC Simatic S7-1200 con sus respectivos módulos de entrada/salida analógica, y una pantalla Touch Screen HMI. Posteriormente, se utilizó el software STEP 7 BASIC V.14 para el escalamiento de las señales analógicas de los lazos de control de nivel (primario) y flujo (secundario), seguido de la programación y sintonización de los controladores con el procedimiento de prueba y error, dando como mejor respuesta un control PI para el lazo primario, y un control P para el secundario. Asimismo, se programó el servidor Web del PLC para permitir que un navegador web de un computador o dispositivo móvil, admita al usuario autorizado acceder y monitorear el proceso de manera remota.*

*Keywords—Control cascada PID, PLC S71200, Touch Screen HMI, Software Step 7.*

## I. INTRODUCCIÓN

Con fines didácticos, en el año 2012, los alumnos con apoyo del docente del curso de Sistemas de Automatización Industrial de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma (URP), diseñaron e implementaron un módulo de control de nivel para el Laboratorio de Control de la URP. Dos años después se desarrolló, por parte de los propios alumnos, una tesis donde se utilizó el PLC Simatic S7-200 en un simple lazo de control para controlar la variable nivel, la cual fue adquirida por un transmisor de nivel ultrasónico y monitoreada a través del software Labview con apoyo de un servidor OPC [2]. Posteriormente, en el año 2017, se adquirieron los PLC Simatic S7-1200 y las pantallas HMI Siemens KTP 700 Basic Color. Fue así como se inició la implementación del presente trabajo utilizando dos lazos de control, uno para la variable nivel y otro para la del flujo, en una estrategia de control en cascada ya que se cuenta con más de una variable o señal de medida, y una variable manipulada o variable de control; de tal manera que la salida del controlador primario en retroalimentación, será el Set Point del controlador secundario también en retroalimentación. Para ello, se desarrolló una programación en el software Step 7 Basic V.14 y se aprovechó de algunas de las nuevas herramientas que presentan estos equipos recientemente adquiridos, tal como la comunicación PROFINET y el servidor web del PLC. Entonces, siendo el área de control y automatización de procesos una rama muy

importante en la especialización del alumno de Ingeniería Electrónica de la URP, se planteó y desarrolló este trabajo con la finalidad de mostrar los principales elementos que intervienen en el control de la variable nivel, de un proceso arbitrario; pues, la experiencia práctica en los recientemente egresados es de vital importancia, porque les permitirá enfrentar situaciones encontradas en el ámbito laboral de diferentes empresas que utilizan la automatización industrial, sea en el sector minero, petróleo, gas, etc. Asimismo, también podrán comprender el monitoreo de variables a través de una pantalla HMI, y la realización del acceso remoto mediante el servicio web que brinda el mismo PLC. Por tal razón, a través del desarrollo de este proyecto, se propone el montaje, la instalación, configuración y programación adecuada de los modernos equipos PLC Simatic S7-1200 y HMI Siemens KTP 700 Basic Color, adquiridos por la URP; asimismo, se realiza el montaje del transmisor de nivel ultrasónico SGM Lektra modelo METER2F4D, y del transmisor de flujo magnético YOKOGAWA modelo AXF025G, ambos adquiridos recientemente por la URP. Igualmente, este trabajo toma importancia porque su implementación permitirá incrementar los conocimientos en los alumnos, y particularmente en aquellos que se inclinan por el área de control y automatización de procesos. Pues, podrán interactuar con la tecnología en una aplicación encontrada en un futuro ámbito laboral, adquiriendo los conocimientos prácticos de sintonización de un control PID y utilización de una estrategia de control en cascada, como alternativa; además, aprenderán lo referente al monitoreo de variables de ingeniería y servicio web para la interacción en tiempo real de manera remota, tal como lo señala un enlace de Siemens del Perú [1].

De esta manera, con el trabajo propuesto se mostrará la programación Ladder realizada en el PLC Siemens S7-1200, que controlará la variable nivel en el módulo de Control del Laboratorio de Control; de forma muy similar, Montalvo y Morocho [3] implementaron un módulo didáctico de montaje Festo utilizando programación Grafset, también en un PLC Siemens S7-1200 más una pantalla HMI y un sistema SCADA. Sin embargo, ellos no utilizaron la variable flujo. Por otro lado, en la tesis de García y Estupiñán [4] se utilizaron las dos variables flujo y nivel controlados por un PID, pero a nivel de una implementación virtual utilizando los software Matlab y Labview, y se vieron en la necesidad de realizar los respectivos modelamientos matemáticos para todo el sistema de control. Es así que, con la propuesta de este trabajo, se logra representar de manera más próxima el control de la variable nivel para un módulo real existente en uno de los laboratorios de la URP.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.294>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

## II. MARCO TEÓRICO

### A. PLC Simatic S7 1200

Es un Controlador Lógico Programable modular, desarrollado por la compañía Siemens y con un modelo de CPU 1214C tipo AC/DC/RLY. Asimismo, este dispositivo permite la manipulación de hasta 14 entradas/salidas digitales a 24 voltios DC, 10 salidas relé, 2 entradas analógicas y una salida de fuente a 24 voltios DC, donde se alimenta el módulo Switch Industrial Ethernet de 5 puertos Scalance XB005 y la pantalla HMI. Además, este PLC, cuenta con una interfaz PROFINET integrada para su comunicación con un computador y una pantalla HMI. También cuenta con un servidor web que puede ser configurado para presentar un acceso remoto [1]. Y, como también, es posible agregar el módulo Signal Board Siemens SB1232 para contar con una salida analógica que interactúe directamente con una válvula neumática de control.

### B. Transmisor de Flujo Electromagnético

El principio del transmisor de flujo electromagnético es la ley de Faraday de inducción según Lana Sarrate [6], donde se aplica el principio del movimiento de un conductor dentro de un campo magnético, con la finalidad de generar un voltaje inducido, el cual es proporcional a la velocidad y por consiguiente al caudal. Ver la siguiente ecuación.

$$e = V * B * D \quad (1)$$

Donde “e” es el voltaje generado en el conductor, “V” es la velocidad del conductor, “B” es el campo magnético, y “D” es el diámetro del conductor. A continuación, en la figura 1, se muestra el transmisor de flujo electromagnético Yokogawa que fue utilizado en este trabajo.



Fig. 1. Transmisor de flujo electromagnético Yokogawa [13].

### C. Transmisor de nivel ultrasónico

Según Creus, A. [5], este transmisor, se basa en la emisión de impulsos ultrasónicos a la superficie del elemento a medir, donde la característica de la superficie debe ser reflejante. Luego, una vez logrado el reflejo, se recibe el eco y se mide el tiempo de emisión y recepción. Para encontrar la distancia en que se encuentra el objeto reflejante, se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = 0.5(v * t) \quad (2)$$

Donde “v” es la velocidad del sonido en el aire y “t” es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del impulso. A continuación, en la figura 2, se muestra el transmisor de nivel ultrasónico SGM Lektra que fue utilizado en este trabajo.



Fig. 2. Transmisor de nivel ultrasónico SGM Lektra [14].

### D. Estrategia de Control en Cascada

Según Åström, K. y Hägglund, T. [7], es aquella configuración en donde se anidan dos o más lazos de control, de tal modo que la salida del controlador primario en retroalimentación es el punto de ajuste del controlador secundario, el cual también se encuentra en retroalimentación. Este tipo de configuración es utilizada cuando se cuenta con más de una variable o señales de medida, y una variable manipulable o variable de control; asimismo, cuando el control retroalimentado simple no satisface su respuesta en un lazo cerrado. Siempre se considera al lazo interno (lazo secundario) el más rápido que el lazo externo (lazo primario).

## III. ACONDICIONAMIENTO Y CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DEL MÓDULO DE CONTROL

Esta investigación se caracteriza por ser aplicada y tecnológica, por lo cual no se utilizaron técnicas estadísticas; más bien, se utilizó el método de “Prueba y Error”, como un procedimiento empírico de ajuste o sintonización con identificación en bucle cerrado [8]. De esta manera, el procesamiento se dividió en diversas etapas comenzando con la configuración del transmisor de nivel ultrasónico, seguido del acondicionamiento del módulo de control de nivel existente, para luego proceder con la creación del proyecto en el software Step 7 Basic V.14 donde se definieron y configuraron los equipos Siemens utilizados, tal como el PLC S7-1200, los módulos de entrada y salida analógica, y la pantalla HMI KTP 700 Basic Color.

### A. Acondicionamiento de los equipos del módulo de control

Tal como fue mencionado anteriormente, el módulo de control de nivel del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería, de la URP, fue diseñado e implementado por alumnos del último año de estudio; por lo cual, se procedió a acondicionar e instalar el nuevo controlador PLC, los módulos de entrada/salida analógica, la pantalla HMI, y los transmisores de nivel y flujo en el módulo ya existente. Esto dio como resultado lo representado en la figura 3a, donde se puede observar la ubicación de cada uno de los elementos del sistema de control, a excepción del controlador PLC con sus

módulos de entrada/salida analógica ubicado en una zona no visible. Por otro lado, la figura 3b muestra el correspondiente diagrama P&ID.

### B. Configuración del transmisor de nivel ultrasónico

Como primer paso, se eligió el Span [9] o alcance de trabajo, siendo este igual a 400 mm y con una medida inicial igual a 1200 mm y medida final igual a 1600 mm. Por lo cual, se procedió a medir desde la parte superior del tanque, lugar donde se encuentra posicionado el transmisor de nivel ultrasónico SGM LEKTRA. Posteriormente, se utilizó el configurador modem HART USB de marca Procomsol modelo HM-USB-ISO que trabaja con el software DevCom 2000, para ingresar los valores elegidos con ayuda de una fuente de alimentación de 24 voltios DC y una resistencia de precisión de 250 ohmios, conectados tal como se puede apreciar en la figura 4.

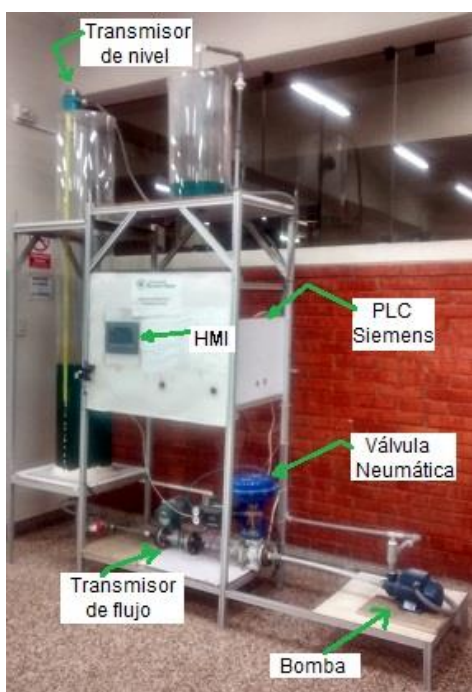


Fig. 3a. Fotografía del módulo de control de nivel del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería, de la URP.

### C. Creación del proyecto y configuración de equipos

Utilizando el Software Step 7 Basic V.14 en la plataforma TIA Portal, se procedió a crear el proyecto a utilizar para esta investigación, agregando el PLC S7-1200 con CPU 1214C y configuración AC/DC/RLY, en la sección “Configurar un dispositivo”. Luego, se procedió agregando en el proyecto el módulo de cuatro entradas analógicas Siemens SM1231, de las cuales solo se utilizaron dos. Una para el transmisor de nivel ultrasónico SGM LEKTRA con la asignación de entrada %IW102, y la segunda para el transmisor de flujo electromagnético YOKOGAWA con la asignación de entrada %IW100; luego, se agregó el módulo de salida analógica Siemens SB1232AQ, al cual se le asignó la salida %QW80

para la válvula de control proporcional HOFMANN modelo M9S-01511-CD, la cual trabaja con el posicionador electroneumático con salida de 4 a 20 mA de marca POWER GENEX modelo SSL-WB1MHL. Inmediatamente, se asignó la dirección IP: 172.17.9.88 al PLC, y finalmente se agregó al proyecto la pantalla HMI Siemens KTP 700 Basic Color, asignándole el número IP: 172.17.9.95. Ver la figura 5.

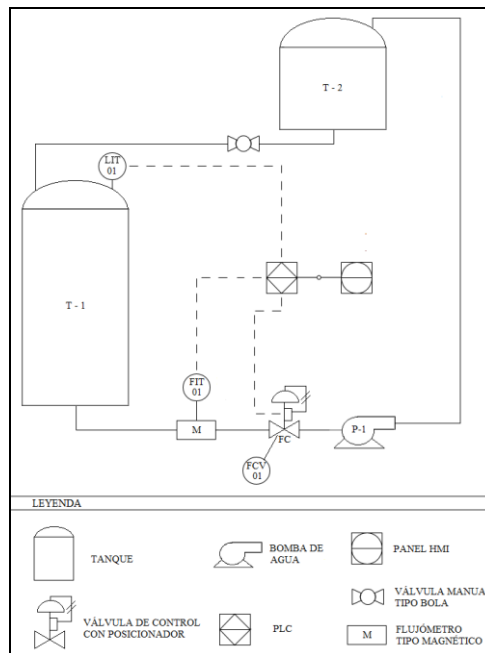


Fig. 3b. Diagrama P&ID del módulo de control de nivel del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería, de la URP.

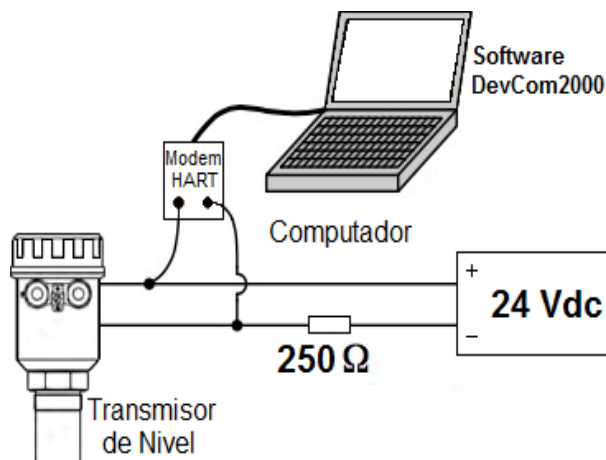


Fig. 4. Conexión del Módem HART para la configuración del transmisor de nivel ultrasónico.

## IV. DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL EN CASCADA

Una vez realizada la implementación y configuración, se continuó con el diseño y programación del control en cascada.

Para ello, se plasmó en el bloque organizacional principal OB1, el esquema eléctrico donde se definieron los botones físicos de encendido y apagado, así como los botones de apagado y encendido desde la pantalla HMI. En seguida, se procedió con la creación de un sub-programa en donde se inició con el escalamiento de las señales analógicas e ingreso del punto de consigna o Set Point. Además, con la finalidad de que el control en cascada trabaje con las variables nivel y flujo, se implementó otro sub-programa para ingresar los mejores parámetros de control para cada caso, de tal forma que ante diferentes valores de Set Point se mantenga márgenes de error mínimos. Posteriormente, se continuó con la programación de la pantalla HMI y finalmente la configuración del servidor web del PLC.

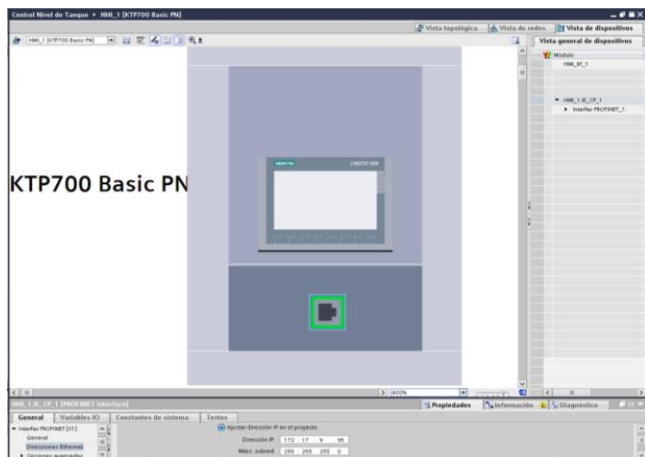


Fig. 5. Configuración de la Pantalla Siemens KTP 700 Basic Color.

### A. Programación de botones de encendido y apagado

La implementación eléctrica de encendido y apagado se encuentra en el bloque organizacional principal OB1 donde se definieron los botones físicos de encendido con el contacto %I0.0 (start), y el de apagado con el contacto %I0.1 (stop), este último para el caso de la electrobomba (motor); y, para el caso de la pantalla HMI, el botón de encendido con el contacto %M0.0 (star\_r), y el de apagado con el contacto %M0.2 (stop\_r). Adicionalmente, un apagado por boyas con el contacto %I0.3. Las boyas se encuentran localizadas en la parte superior del tanque auxiliar, con el fin de prevenir algún tipo de derrame por sobre llenado.

### B. Escalamiento de las señales analógicas e ingreso del Set Point

Para ello, se crearon sub-programas tanto para la normalización y escalamiento de las señales analógicas obtenidas de los transmisores de nivel ultrasónico (dirección %IW102), y de flujo (dirección %IW100), así como también para el ingreso del Set Point (definido como %MD32). Para el caso del valor de salida analógica se estableció en porcentaje de apertura de la válvula, definido con la dirección %MD24. Posteriormente, en el segmento 5, se realizó la normalización y el des-escalamiento hacia la dirección %QW80. Ver figura 6.



Fig. 6. Normalización, Escalamiento y Des-escalamiento de Señales Analógicas.

### C. Control en cascada de los lazos primario y secundario

La estrategia de control utilizada es la de cascada debido a que existen varias señales de medida y una variable de control; además, conociendo que el software no cuenta con una librería para el control en cascada, se procedió a la interconexión del lazo primario con el lazo secundario, de tal modo que la salida del controlador primario en retroalimentación, sea el Set Point del controlador secundario también en retroalimentación. Así, la salida de este último será el que actuará finalmente sobre la válvula de control. Para ello, se creó un nuevo sub-programa utilizando los valores escalados previamente, y agregando un bloque organizacional OB3, del tipo interrupción cíclica colocando en el primer segmento la instrucción PID\_Compact\_1, el cual corresponde a la variable nivel cuya entrada de Set Point es el valor de la dirección %MD32 correspondiente al Segmento 1 de la figura 6; y, por otro lado, del Segmento 2 de la misma figura 6, se tomó el valor escalado del transmisor de nivel ultrasónico en la dirección %MD0 que representa la entrada del controlador para la variable nivel,

que a su vez tiene como salida la dirección %MD40 mostrada en la figura 7.

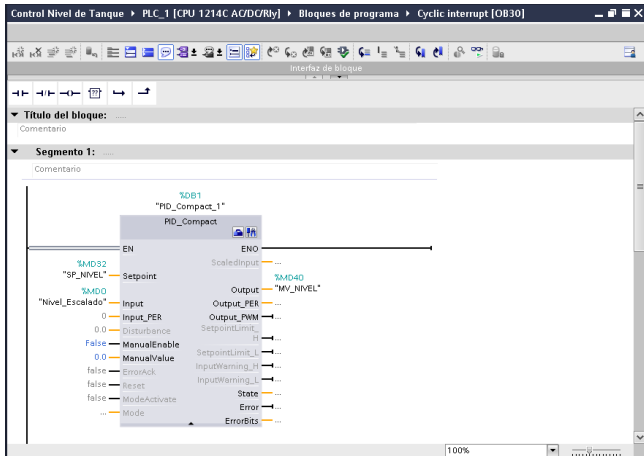


Fig. 7. Programación del PID del Lazo Primario.

Luego, para interconectar la variable nivel del lazo primario con la variable flujo del lazo secundario, se procedió en el mismo bloque organizacional del tipo interrupción cíclica, a agregar un segundo segmento representado por la instrucción PID\_Compact\_2 que trabaja con la variable flujo y tiene como entrada de Set Point el valor de salida del controlador de la variable nivel. Entonces, el valor escalado del transmisor de flujo, dirección %MD8 (Segmento 4 de la figura 6), representa la entrada del segundo controlador; de esta forma, la salida del mismo es el porcentaje de apertura de la válvula neumática, dirección %MD24. Ver la figura 8.

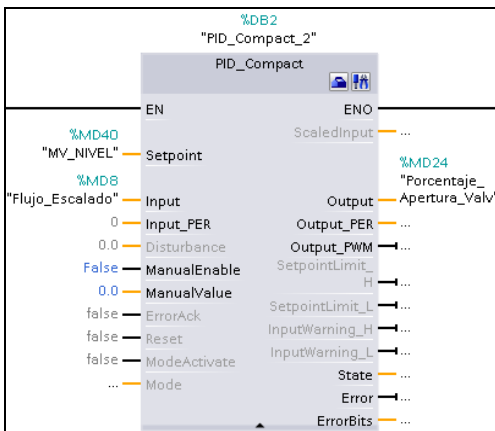


Fig. 8. Programación del PID del Lazo Secundario.

#### D. Programación de la Pantalla HMI

La pantalla HMI es un equipo de visualización y actuación, el cual recibe la denominación de interfaz máquina-usuario [10], que permite el diálogo entre el operador y el controlador [11]. Por lo cual, es una interfaz de interacción para el monitoreo y control del módulo de control de nivel, permitiendo visualizar los valores de nivel y flujo, porcentaje de apertura de la válvula de control y nivel de Set Point

elegido, y control de encendido y apagado de la electrobomba. Entonces, para lograr tal tarea, se agregó la pantalla HMI Siemens KTP 700 Basic al programa y se trabajó en la imagen raíz, donde se creó el botón INICIO que corresponde a la variable “START\_REMOTO” y que se activa con un bit al pulsarlo; luego, se creó el botón PARADA que corresponde a la variable “STOP\_REMOTO”. Posteriormente, se agregó un gráfico en forma de tanque y sobre él se colocó una barra de escala con un valor mínimo de 0 cms y un valor máximo de 100 cms, y cuya variable del proceso será la del PLC “Sal\_Real\_Nivel”. Esta variable a su vez, se encargó de visualizar de forma gráfica la altura que iba alcanzando el líquido en el tanque principal. Inmediatamente, se creó el campo de entrada y salida para la Válvula, el cual muestra en valor de porcentaje asignado por el valor de la variable del PLC “Porcentaje\_Apertura\_Valv”. Luego, se creó el campo de entrada y salida para la variable flujo, el cual muestra el valor en litros por minuto asignado por el valor de la variable del PLC “Flujo\_Escalado”, y como también se creó el campo de entrada y salida para el transmisor de nivel, el cual muestra en milímetros asignado por el valor de la variable del PLC “Nivel\_Escalado”. Se suma a todo ello, la creación de un campo de entrada y salida para la variable nivel, el cual muestra en milímetros el Set Point asignado por el valor de la variable del PLC “SP\_NIVEL”; y asimismo, se creó el campo de entrada y salida para el Nivel Tanque, el cual muestra en centímetros el valor de la variable del PLC “Sal\_Real\_Nivel” y cuyo valor es el mismo de la barra del gráfico del tanque. Finalmente, se creó una animación de uso de la electrobomba, agregando la imagen de un motor a esta imagen raíz, por lo cual cambia a color verde cuando se encuentra encendida, asignando a la variable del PLC “BOMBA” el rango de 1 a 1 en las propiedades de la animación. Por otro lado, toma el color gris cuando la electrobomba se encuentra apagada, asignando a la variable del PLC “BOMBA” el rango de 0 a 0 en las propiedades de la animación. Ver la figura 9.

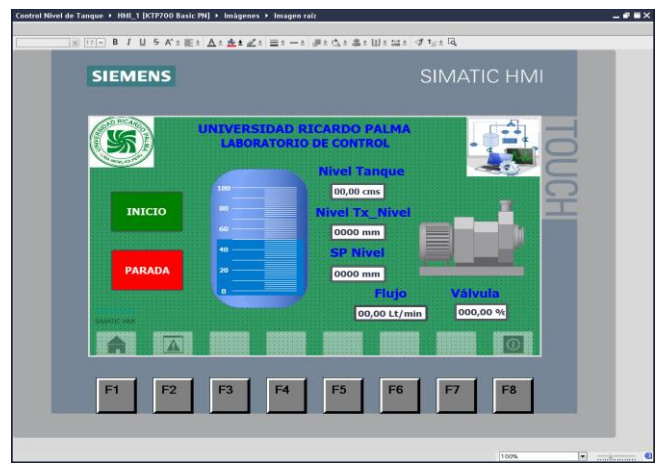


Fig. 9. Programación de la Pantalla HMI.

#### E. Configuración del servidor Web del PLC

El servidor Web del PLC sirve para que el usuario autorizado acceda de manera remota, monitoreando y

administrando mediante el uso del navegador web de un computador o dispositivo móvil, a través de la red [12]. Para este proyecto, se otorga el acceso al encendido y apagado de la electrobomba. Por ello, para configurarlo, primero se ingresó al área de propiedades del PLC, y luego al servidor Web donde en la sección Páginas por el Usuario se escribió la ruta del archivo que sirve como página de inicio: "webserver71200.htm", y cuyo contenido se representa en la figura 10a. Seguidamente, se generaron los bloques necesarios del servidor Web para su puesta en uso, no sin antes crear un usuario y una contraseña de seguridad con un nivel de acceso denominado "administrative", la cual es configurada en la administración de usuarios dentro de las propiedades del propio servidor Web. En último lugar, se procedió a ingresar al PLC desde cualquier dispositivo móvil o computadora por su navegador web escribiendo la dirección IP: 172.17.9.88, utilizando el usuario y la contraseña anteriormente creada. Con ello, emerge una página que da acceso al arranque y parada de la electrobomba, y pone en funcionamiento todo el proyecto desarrollado. Ver la figura 10b.

### V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron varias pruebas de sintonización con los parámetros de control PID de la variable nivel y flujo, los cuales fueron ingresados en la ventana de configuración de cada uno de ellos. Además, se habilitó la activación de entrada manual para ingresar nuevos valores en reemplazo a los iniciales utilizados en el programa, con el fin de obtener una respuesta más próxima al punto de consigna. Por lo cual, la mejor respuesta del proceso se obtuvo con un procedimiento de prueba y error, comenzando con el lazo primario y continuando con el lazo secundario, y partiendo de la proporción de ganancias proporcionales de 1:4. Se consideró este factor de proporcionalidad por recomendación y experiencia de docentes que trabajan en el sector industrial.

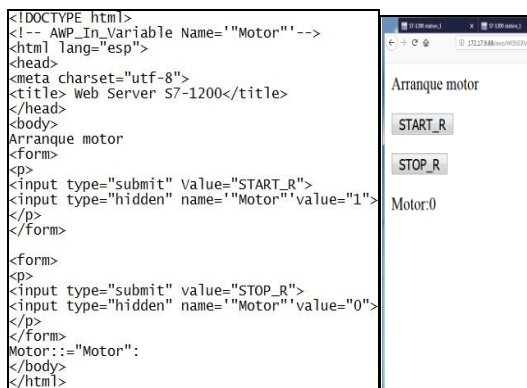


Fig. 10. Izquierda: Edición del archivo webserver71200.htm. Derecha: Página de acceso remoto al PLC.

De esta manera, después de realizar varios ensayos, los mejores valores de sintonización logrados son los siguientes:

Controlador Primario:

Ganancia Proporcional  $K_p=0.25$ .

Constante Integral  $K_i=10.31$ .

Constante Derivativa  $K_d=0$ .

Controlador Secundario:

Ganancia Proporcional  $K_p=2.5$ .

Constante Integral  $K_i = 0$ .

Constante Derivativa  $K_d=0$ .

Posteriormente, se muestra una descripción breve y las correspondientes respuestas gráficas para los resultados alcanzados al utilizar un Set Point de 1300 mm, 1400 mm y 1500 mm, con y sin perturbación. En cuanto a la perturbación, esta fue inducida abriendo una de las tomas de desfogue en la tubería de salida de descarga ubicada en la parte inferior del tanque principal, contabilizándolo un tiempo específico de tal forma que se extraiga en todos los casos un volumen de 4.5 litros.

#### A. Resultados para un valor de Set Point de 1300 mm sin perturbación

En la figura 11 se muestra la evolución de la variable nivel para el Set Point de 1300 mm. Para ello, se comenzó con un nivel situado inicialmente en 1200 mm, y después de ingresar tal Set Point al controlador primario, se observa que la variable nivel de agua (representada de color verde) se aproxima al valor deseado o Set Point (representado de color negro), en 300 segundos aproximadamente y generando una respuesta más estable, una disminución del error y pequeñas fluctuaciones. De esta forma, se aproxima al Set Point y se obtiene una salida en la dirección %MD40 y representada de color rojo, que a su vez se entregará al controlador secundario como un nuevo valor de Set Point.

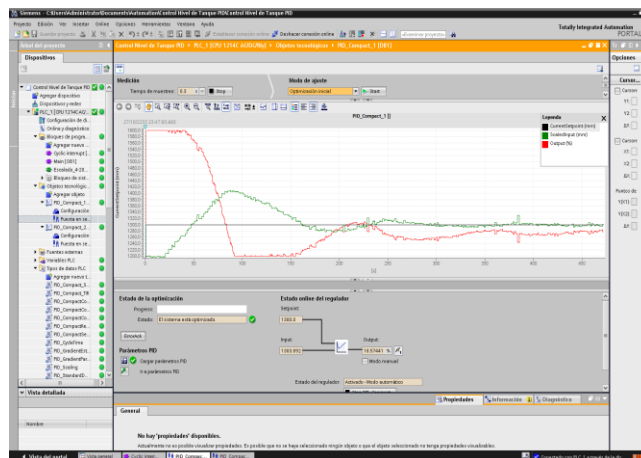


Fig. 11. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1300 mm. (sin perturbación).

Luego, en la figura 12, se muestra la evolución de la variable flujo cuando el controlador secundario recibe como entrada de Set Point la salida del controlador primario (representado de color negro), y la variable de proceso flujo (representado de color verde). De esta manera, tal controlador entrega una salida en porcentaje de apertura de la válvula en la dirección %MD24 (representada de color rojo) y con un valor

de 0% a 100% del paso del agua. Por lo cual, se observa un comportamiento de la variable flujo muy próximo a la salida del controlador primario.

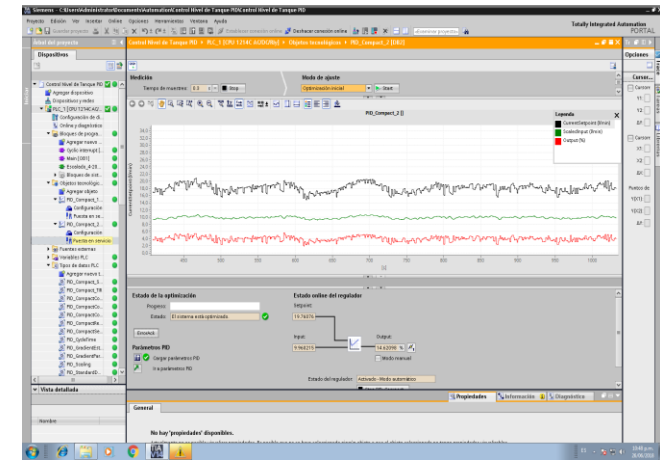


Fig. 12. Comportamiento del controlador secundario con S.P.=1300mm. (sin perturbación).

**B. Resultados para un valor de Set Point de 1400 mm sin perturbación**

Una vez logrado el control con el valor de Set Point en 1300 mm, se procedió a cambiarlo al valor de 1400 mm. Por lo cual, se logra establecer la variable de proceso nivel (gráfico de color verde) muy próximo al Set Point (gráfico de color negro) en aproximadamente 280 segundos, tal como se muestra en la figura 13.

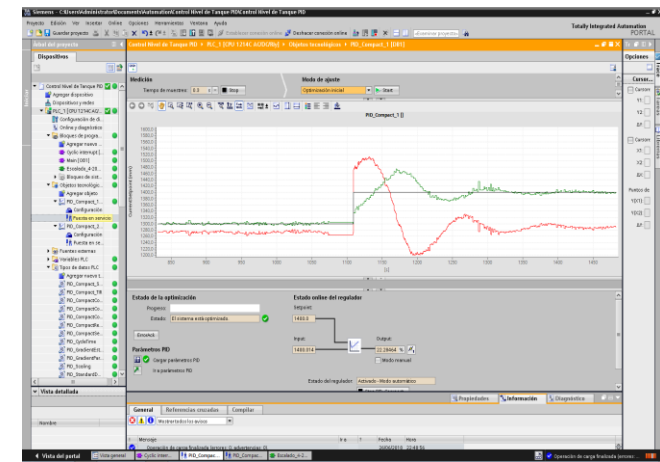


Fig. 13. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1400mm. (sin perturbación).

Luego, en la figura 14, se observa la evolución de la variable flujo que también demuestra un comportamiento muy próximo a la salida del controlador primario.

**C. Pruebas para un valor de SetPoint de 1500 mm sin perturbación**

Después de lograr el control con el valor de Set Point en 1400 mm, se procedió a cambiarlo al valor de 1500 mm. Por

lo cual, se logra establecer la variable de proceso nivel (gráfico de color verde) muy próximo al Set Point (gráfico de color negro) en aproximadamente 350 segundos, tal como se muestra en la figura 15.

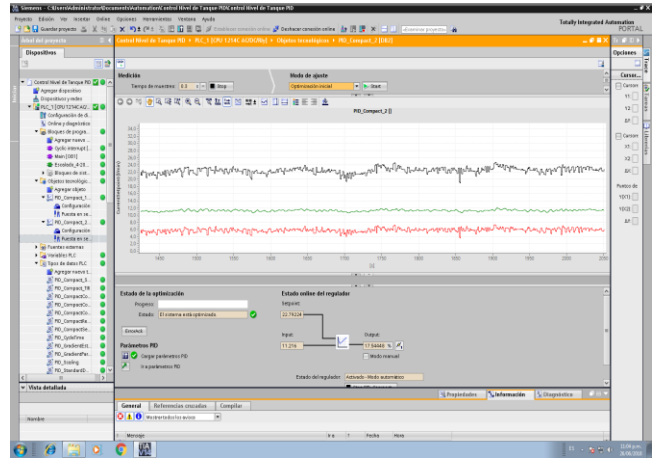


Fig. 14. Comportamiento del controlador secundario con S.P.=1400mm. (sin perturbación).

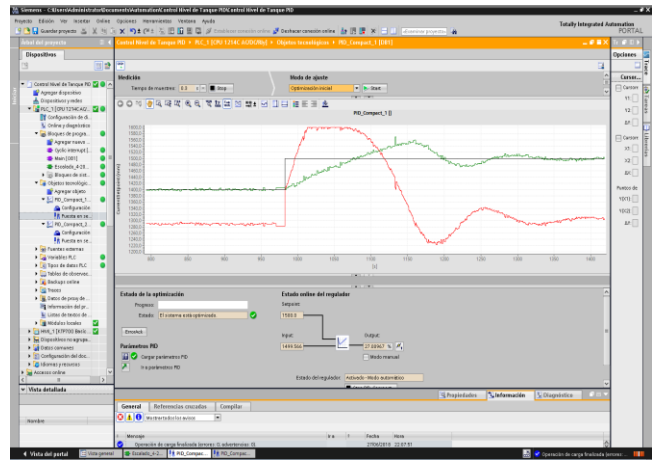


Fig. 15. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1500mm. (sin perturbación).

Luego, en la figura 16, se observa la evolución de la variable flujo, del lazo secundario, y también demuestra un comportamiento muy próximo a la salida del controlador primario.

De las tres pruebas realizadas, se obtuvieron las principales características correspondientes a los resultados alcanzados en cuanto al control de la variable nivel desde el punto de vista temporal. Ver la Tabla 1.

Tabla. 1. Principales características de las pruebas realizadas sin perturbación.

VALORES DE S.P.	TIEMPO DE ESTABLECIM.	SOBRE IMPULSO	TIEMPO PICO
SP = 1300 mm.	300 seg.	100 mm.	86 seg.
SP = 1400 mm.	280 seg.	70 mm.	75 seg.



SP = 1500 mm.	350 seg.	150 mm.	80 seg.
---------------	----------	---------	---------

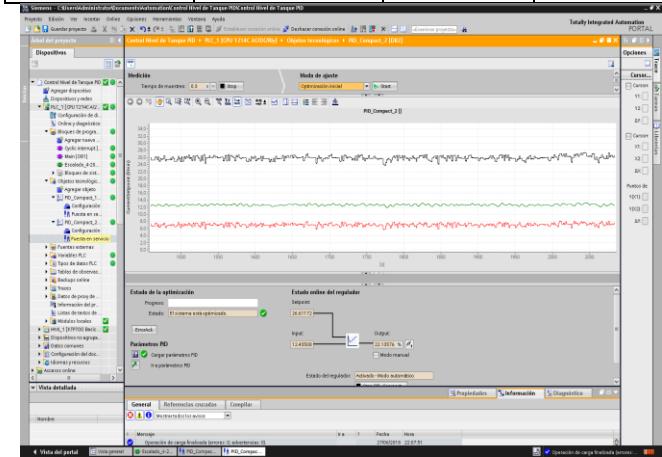


Fig. 16. Comportamiento del controlador secundario con S.P.=1500mm. (sin perturbación).

#### D. Pruebas para un valor de SetPoint de 1300 mm con perturbación

En la figura 17 se observa cómo se logra llegar al valor del SetPoint aún con la presencia de perturbación, la cual fue generada entre el segundo 51 y segundo 110. Asimismo, se visualiza en la misma figura el establecimiento de la variable nivel en el segundo 270, lo cual representa un tiempo de establecimiento igual a 160 segundos.

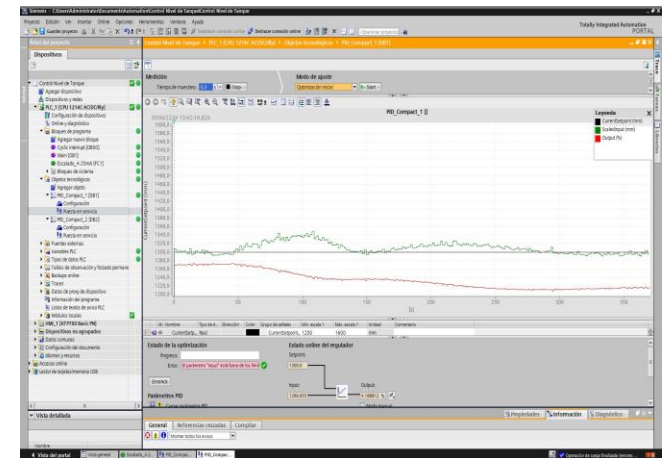


Fig. 17. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1300mm. (con perturbación).

#### E. Pruebas para un valor de SetPoint de 1400 mm con perturbación

De la misma manera, en la figura 18 se observa cómo se logra llegar al valor del SetPoint aún con la presencia de perturbación, la cual fue generada entre el segundo 70 y el segundo 140. Asimismo, se visualiza en la misma figura el establecimiento de la variable nivel aproximadamente en el segundo 290, lo cual representa un tiempo de establecimiento igual a 150 segundos.

#### F. Pruebas para un valor de SetPoint de 1500 mm con perturbación

Tan igual que en los dos casos anteriores, en la figura 19 se observa cómo se logra llegar al valor del SetPoint aún con la presencia de perturbación, la cual fue generada entre el segundo 70 y segundo 220. Asimismo, se visualiza en la misma figura el establecimiento de la variable nivel en el segundo 420, lo cual representa un tiempo de establecimiento igual a 200 segundos.

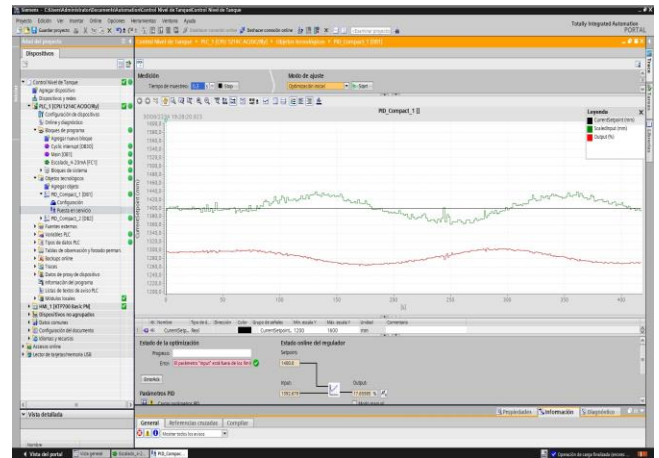


Fig. 18. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1400mm. (con perturbación).

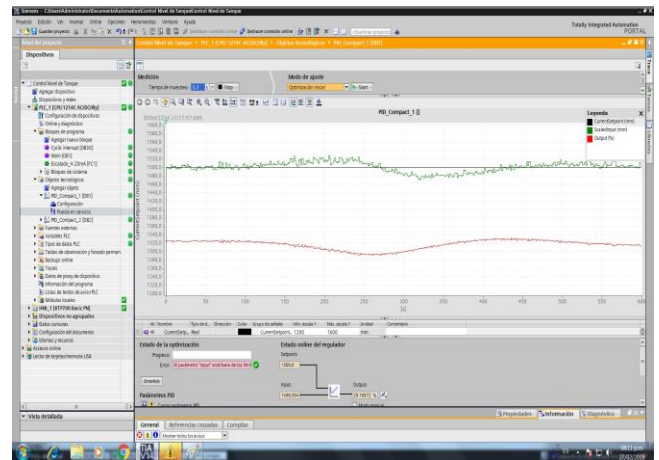


Fig. 19. Comportamiento del controlador primario con S.P.=1300mm. (con perturbación).

Por lo tanto, para las tres pruebas realizadas con presencia de perturbación, se obtuvieron las principales características correspondientes a los resultados alcanzados en cuanto al control de la variable nivel desde el punto de vista temporal. Ver la Tabla 2.

#### DISCUSIONES

Una mejora para este trabajo es incluir la implementación de un software SCADA, como el Simatic WinCC, para tener la visualización del proceso mediante un computador en tiempo real, y donde sea posible incluir la emisión de avisos a eventos

programados, así como la emisión de reportes. Además, para un posterior desarrollo, se podría optar por utilizar un variador de frecuencia para un control de la velocidad de la electrobomba, y de esta manera comparar con ella la respuesta al control del proceso. De esta forma, el control en cascada propuesto mejoraría al contar con una mayor información de mediciones tomadas por este equipo, tanto como voltaje, corriente, consumo de energía, transmisión de alarmas y fallas; y con ello se tomarían las decisiones más adecuadas en tiempo real.

Tabla. 2. Principales características de las pruebas realizadas con perturbación.

VALORES DE S.P.	TIEMPO DE ESTABLECIM.	SOBRE IMPULSO	TIEMPO PICO
SP = 1300 mm.	160 seg.	25 mm.	110 seg.
SP = 1400 mm.	150 seg.	38 mm.	110 seg.
SP = 1500 mm.	200 seg.	30 mm.	105 seg.

### CONCLUSIONES

Se modernizó el módulo de control de nivel del Laboratorio de Control de la Universidad Ricardo Palma, para permitir que los alumnos realicen sus experiencias prácticas utilizando tecnología actual, y propia de un ambiente laboral en las áreas de instrumentación y automatización industrial. Para ello, se sustituyó el PLC Siemens S7-200 por el Siemens S7-1200, el sensor ultrasónico SRF06 por el transmisor de nivel ultrasónico SGM Lektra, el módulo Siemens EM-235 para S7-200, por el módulo de cuatro entradas analógicas Siemens SM1231 y el módulo de una salida analógica Siemens SB1232, ambas para S7-1200; y finalmente el software de programación, del STEP 7 - Micro/WIN V 4.0 al STEP 7 Basic V14.

La programación del nuevo PLC Siemens S7-1200 se realizó de tal manera que se pudo trabajar con las dos variables de ingeniería: Nivel y Flujo, en un control de tipo cascada. La implementación del control en cascada utilizando las variables nivel y flujo, se logró anidando los dos lazos de control. Para esto, se eligió el flujo como lazo secundario por su rapidez. Y, el nivel, como lazo primario. Por ello, la salida del controlador primario se conectó como entrada de Set Point para el controlador secundario, y se utilizó la salida de corriente de este último, como indicador del porcentaje de apertura de la válvula neumática. Así, el tiempo de establecimiento alcanzado para el control de la variable nivel, osciló alrededor de los 300 segundos para las tres pruebas realizadas con valores de Set Point diferentes y ausencia de perturbación. Y, para el caso de las pruebas con presencia de perturbación, el tiempo de establecimiento descendió a 160 segundos aproximadamente. Por otro lado, en el caso del lazo secundario (flujo), fue necesario asignarle una alta ganancia con una proporción de 10 a 1 con respecto al lazo primario (nivel). Así como también, se llegó a la conclusión de que fue suficiente que el controlador secundario sea implementado

como un controlador proporcional puro, mientras que el primario como un controlador proporcional e integral para una mejor respuesta final.

La programación de la pantalla táctil Siemens KTP 700 Basic, se realizó con librerías de gráficos del software STEP 7 Basic V14. Por lo cual, se logró su verificación al ser puesta en marcha el módulo de control de nivel desde esta pantalla HMI, logrando ser visualizado todos los valores programados no sin antes se encuentre correctamente instalado en la misma PC o Laptop utilizada el software STEP 7 Basic V14 con una correcta comunicación entre sí. Asimismo, se puso en marcha el acceso remoto al encendido y apagado del módulo de control de nivel con el uso del servidor web del PLC. Para ello, fue necesario deshabilitar la conexión al servidor proxy de los dispositivos que harían uso del servidor web, también se dispuso la conexión a la red LAN de un Access Point para el acceso remoto desde un teléfono celular, tablet u otro dispositivo móvil.

### REFERENCIAS

- [1] Siemens. (2018). "Controladores Modular". Visitado en octubre del 2018. Recuperado de [https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores\\_modulares/controlador\\_basico\\_s71200/pages/s7-1200.aspx](https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores_modulares/controlador_basico_s71200/pages/s7-1200.aspx)
- [2] Campos, D. y Gonzalez, M. (2014). "Implementación de un sistema de monitoreo y control de un módulo de medición de nivel, a través de un sistema SCADA". Tesis de Ingeniero Electrónico, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Perú.
- [3] Montalvo, J. y Morocho, W. (2011). "Diseño e Implementación de un sistema Scada para control de procesos de un módulo didáctico de montaje Festo utilizando PLC y una pantalla HMI, caso práctico: en el Laboratorio de Automatización de la FIE". Tesis de Ingeniero en Electrónica, Control y Redes Industriales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/1329>
- [4] García, C. y Estupiñán, H. (2014). "Módulo virtual para control de nivel y flujo de agua". Tesis de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería y Administración, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Recuperado de [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1675/digital\\_21158.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1675/digital_21158.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] Creus, A. (2011). "Instrumentación Industrial" (8va ed.). México: Editorial Alfaomega.
- [6] Lana Sarrate. (2018). "Instrumentación para la medición de caudal". (pp 17). Visitado en octubre del 2018. Recuperado de [http://www.lanasarrate.es/files/20101218192606\\_0427\\_4fccd2e2-13a3-443a-a117-c5feb15594e.pdf](http://www.lanasarrate.es/files/20101218192606_0427_4fccd2e2-13a3-443a-a117-c5feb15594e.pdf)
- [7] Åström, K. y Hägglund, T. (2009). "Control PID Avanzado" (1ra ed.). España: Pearson Educación S. A.
- [8] Mandado, E., Marcos, J., Fernández, C., y Armesto, J. (2010). "Autómatas Programables y Sistemas de Automatización" (2da ed.). (pp. 403). Mexico: Alfaomega.
- [9] Creus, A. (2009). "Instrumentos Industriales su Ajuste y Calibración" (3ra ed.). (pp. 6). Barcelona: Marcombo.
- [10] Mandado, E., Marcos, J., Fernández, C., y Armesto, J. (2010). "Autómatas Programables y Sistemas de Automatización" (2da ed.). (pp. 638). México: Alfaomega.
- [11] Piedrafita, R. (2001). "Ingeniería de la Automatización Industrial" (pp. 5). México: Alfaomega.
- [12] Siemens. (2018). "Webserver Function Manual" (pp. 16). Visitado en junio del 2018. Recuperado de:

[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/560/59193560/att\\_895962/v1/s71500\\_websvrer\\_function\\_manual\\_es-ES\\_es-ES.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/560/59193560/att_895962/v1/s71500_websvrer_function_manual_es-ES_es-ES.pdf)

- [13] Yokogawa de México (2019). “Medidores de Flujo Magnético ADMAG AXF”. Visitado en enero del 2019. Recuperado de: <https://www.yokogawa.com/mx/solutions/products-platforms/field-instruments/flow-meters/magnetic-flowmeters/admag-axf/>
- [14] SGM Lektra. Process Control and Measurement. “Meter Ultrasonic level transmitter”. Visitado en enero del 2019. Recuperado de: <http://www.sgm-lektra.com/en/meter.htm>