

# Implementación de una planta piloto para el desarrollo integral de laboratorios remotos

Juan Valdiviezo Espinoza, William Ipanaqué Alama, Member IEEE, Juan Soto Bohórquez e Iván Belupú Amaya

**Title— Implementation of a pilot plant for the integral development of remote laboratories**

**Abstract— This article is an integral proposal of remote laboratories that complements the classes and the traditional laboratories of the subjects of Automatics at Universidad de Piura. Four control loops have been implemented in the FESTO Compact Workstation pilot plant to remotely manipulate them: level control, flow control, pressure control and temperature control; in each one of them the students must identify the open-loop process, understand the nature of the process and finally control it in a closed loop, all this in an automated and remote way through the Internet. EasyPort and DirectLogic06 PLC have been used for module control, DirectSOFT software for PLC programming, FESTO Didactic EzOPC and NI OPC Servers for communication and mainly LabVIEW for graphic interface and data processing.**

**Index Terms— Remote laboratory, automatic control, LabVIEW, FESTO.**

## I. INTRODUCCIÓN

EN Ingeniería, cobra vital importancia la realización de laboratorios, conocidos como tradicionales o convencionales. Los estudiantes, guiados por el profesor del curso o una persona debidamente capacitada, observan y llevan a cabo pequeños experimentos con el fin de conocer la importancia de la aplicación de los conocimientos teóricos en la industria y en el mundo real.

El panorama de los laboratorios ha ido mejorando en los últimos años, el desarrollo de tecnologías web, como Internet, han hecho posible buscar, crear y ejecutar diversas herramientas, cuya implementación ha aumentado la calidad de procesos de enseñanza y aprendizaje [1].

La tendencia es realizar las prácticas experimentales sin la necesidad de estar presentes físicamente en el mismo espacio de los equipos utilizados, pero que aun así, el usuario pueda tener acceso para interactuar directamente con los experimentos. Como resultado de esta búsqueda, han surgido los laboratorios virtuales y remotos como una buena opción, los cuales permiten maximizar el entorno de

aprendizaje de los alumnos, complementan los tradicionales métodos de enseñanza y consiguen explorar y maniobrar con más seguridad y facilidad que los laboratorios convencionales [2], [3].

[4]-[8], mencionan distintas universidades y centros educativos que tienen como proyectos a los laboratorios virtuales y remotos.

Ambos tipos de laboratorios se definen de la siguiente manera: Un laboratorio virtual es cuando una planta es representada vía modelos matemáticos, los cuales son realizados mediante simplificaciones de procesos reales, y como tal, no pueden reproducir cada aspecto del fenómeno real; mientras que un laboratorio remoto es cuando la interfaz permite al usuario manipular y monitorear plantas físicas y reales, localizadas en distintos espacios físicos donde no se tiene contacto directo con los equipos utilizados [9]-[12].

Estas dos opciones representan herramientas importantes que han surgido como posibles soluciones a los inconvenientes y dificultades que presentan los laboratorios tradicionales. Los principales problemas para la correcta elaboración de un laboratorio son: la escasez de medios por parte de los docentes y del centro de estudios, suficiente personal idóneo, cantidad de equipos necesarios, y la poca disponibilidad de horarios y aulas [12]-[14].

El objetivo de este estudio fue lograr el control remoto de la estación de trabajo Compact Workstation FESTO, para elaborar, por primera vez, dos propuestas de laboratorios remotos con el mismo módulo. Se ha aplicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, específicamente, en las asignaturas de Sistemas Automáticos de Control y de Control Industrial, dictadas en el programa académico de Ingeniería Mecánico - Eléctrica. En la primera propuesta, se debe identificar el proceso a lazo abierto con métodos básicos de identificación y luego sintonizar un PID (Controlador Proporcional Integral Derivativo) para su control a lazo cerrado; mientras que, en la segunda propuesta, se debe identificar el proceso a lazo abierto, pero con métodos más avanzados, finalmente, se aplica un control predictivo a lazo cerrado. En el primer caso, se analizarán hasta cuatro lazos de control: de nivel, de flujo, de presión y de temperatura; mientras que, en el segundo caso, sólo se hará respecto del control de nivel.

Hoy en día, los laboratorios virtuales y remotos ya son una realidad, sin embargo, en Perú y en Latinoamérica, aún es un terreno por explorar, en el cual se puede aplicar conocimiento propio para mejorar y superar las propuestas existentes. En el caso del presente trabajo, la arquitectura del sistema es la empleada por muchos, pero se ha usado otra interfaz con acceso web directo, sin descargar ningún

Juan Valdiviezo Espinoza, Universidad de Piura, Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú (email: [juan.valdiviezo@udep.pe](mailto:juan.valdiviezo@udep.pe)). (<https://orcid.org/0000-0001-7883-1742>)

William Ipanaqué Alama, Universidad de Piura, Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú (email: [william.ipanaque@udep.pe](mailto:william.ipanaque@udep.pe)). (<https://orcid.org/0000-0003-4039-4422>)

Juan Soto Bohórquez, Universidad de Piura, Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú (email: [juan.soto@udep.pe](mailto:juan.soto@udep.pe)). (<https://orcid.org/0000-0001-9157-3098>)

Iván Belupú Amaya, Universidad de Piura, Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú (email: [ivan.belu@gmail.com](mailto:ivan.belu@gmail.com)).

(<https://orcid.org/0000-0003-3692-5446>)

software, solamente un plugin proporcionado por el docente del curso, además, de emplear una planta piloto que simula un proceso real industrial.

Este artículo es la extensión del trabajo presentado en la 16<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Innovation in Education and Inclusion” [16], el cual incluye tres lazos de control más para el curso de Sistemas Automáticos de Control, así como la implementación de una plataforma propia donde se podrá evaluar en línea al alumno. Además, se ha agregado otros dispositivos como el EasyPort para que el alumno se familiarice con más instrumentos y equipos de la industria. Se ha buscado desarrollar una propuesta integral del laboratorio remoto poniendo énfasis en el antes, durante y después del mismo.

A continuación, se describe la estructura del resto del artículo: En la sección 2, se explica el sistema del laboratorio a distancia, los elementos (software y hardware), el montaje, la arquitectura de software y la conectividad de red. En la sección 3, se describe la programación de todos los equipos y los software que intervienen directa e indirectamente en el desarrollo e implementación del laboratorio remoto. En el apartado 4, se muestra la experimentación y los resultados que el estudiante obtendría si opera cada una de las opciones que se han programado en la sección 3. En la sección 5, se da a conocer los resultados de la evaluación pedagógica después de haber aplicado la segunda propuesta en su respectiva asignatura. Finalmente, se señalan las conclusiones.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DEL LABORATORIO A DISTANCIA

Un laboratorio remoto permite llevar a cabo experimentos reales desde cualquier punto del mundo que posea acceso a Internet, siendo esta característica su principal ventaja. Operan remotamente sobre ciertos dispositivos didácticos o industriales, es decir, se puede realizar las prácticas tal y como se harían estando en los laboratorios de la universidad o en la propia planta, construyendo circuitos reales, midiendo las señales con los mismos equipos y pudiendo observar el proceso en tiempo real.

De la búsqueda de la fácil accesibilidad y del entendimiento simple de los requerimientos para un buen laboratorio remoto, se desprenden varios problemas y adversidades, por lo que realizar un laboratorio remoto o controlar un proceso industrial, a distancia o vía web, requiere de una metodología que puede resultar muy compleja en su elaboración.

### A. Explicación del laboratorio remoto

El presente trabajo tiene como eje central la elaboración y aplicación de las propuestas de laboratorio remoto en los cursos de Sistemas Automáticos de Control y Control Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura. Se busca manipular a distancia los cuatro lazos de control en la planta piloto Compact Workstation FESTO, identificar su proceso a lazo abierto y controlarlo a lazo cerrado. Además, se ha instalado cámaras web para monitorear el proceso, así como un sistema de almacenamiento de los datos recogidos.

Para conseguir el objetivo de controlar la planta piloto, se necesita la realización de dos etapas:

- **Módulo de sistema de control:** Un dispositivo de la familia FESTO o un PLC, envía las señales analógicas para regular el funcionamiento de la bomba, tanque de presión o calentador propios del FESTO; de esta manera el nivel, flujo, presión o temperatura del agua son manejados como el usuario desee. Luego, a través de un sensor de nivel de ultrasonido, un caudalímetro, un manómetro o sensores de temperatura encargados de leer los diferentes parámetros, se mandan las señales de corriente al PLC para la adquisición de datos. La fig. 1 resume en un cuadro esquema las conexiones para el control de nivel.
- **Acceso remoto:** El uso de una computadora es esencial porque permite programar, almacenar y analizar datos, visualizar el comportamiento de un proceso, y lo más importante en este trabajo, almacena la plataforma remota, donde los usuarios (alumnos de la Facultad de Ingeniería) manipulan una estación de trabajo real. La computadora actúa como la parte del servidor, por lo que tiene el mando del controlador, lleva a cabo el proceso vía Internet, obteniendo datos, gráficos, tablas, entre otros, de los resultados conseguidos.

Se han utilizado los siguientes programas: *DirectSOFT*, para la programación del PLC, *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)* para la interfaz gráfica y el procesamiento de datos, y un servidor OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*) para la comunicación entre el PLC y el LabVIEW.

### B. Elementos utilizados en el laboratorio remoto

La importancia de realizar laboratorios, como complemento de una determinada asignatura, radica en la aplicación de los conocimientos teóricos a la práctica, y esto no sería posible si no se utilizan equipos e instrumentos idóneos. Sería mejor si dichos equipos son empleados en la industria o si simulan fidedignamente procesos industriales, tal como sucede, por ejemplo, con las plantas piloto. En este caso, los equipos empleados en la elaboración del laboratorio remoto son los siguientes:

- **MPS®PA Compact Workstation FESTO:** Es una

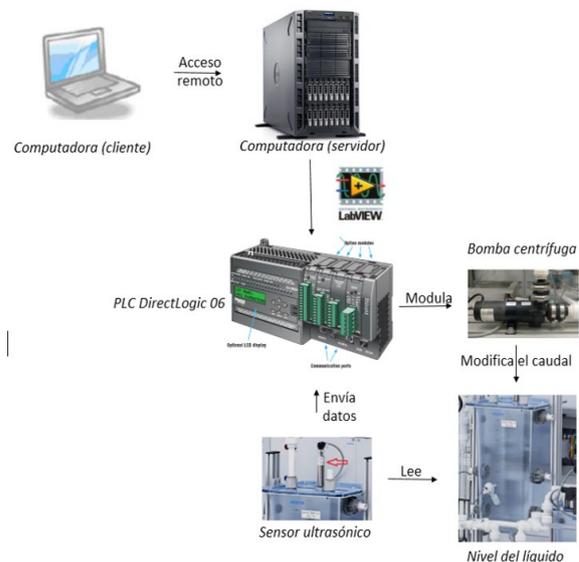


Fig. 1 Esquema del módulo de control remoto

planta piloto, fabricada por la empresa alemana FESTO, la cual permite estudiar hasta cuatro procesos (cuatro lazos cerrados de control): Control de nivel, control de flujo, control de temperatura y control de presión. Este módulo didáctico (ver fig. 2), ubicado en el Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad de Piura, es empleado para prácticas de laboratorio e investigación en diversas asignaturas a nivel pregrado y posgrado, ya que cuenta con herramientas necesarias para un aprendizaje real en el campo de la automatización y comunicación (como son actuadores, sensores digitales y/o analógicos, paneles de control, etc.).

- EasyPort: Es un dispositivo electrónico fabricado por la misma compañía FESTO, lo cual facilita la conexión con la estación de trabajo. Se conecta a la computadora vía USB y ésta viene a ser el controlador del proceso. Se alimenta con 24VDC directamente de la planta piloto.
- PLC DirectLOGIC 06: Es un PLC fabricado por la compañía *Koyo Electronics Industries*. Se encarga de recibir las indicaciones, leer información y enviar datos obtenidos; es la pieza clave dentro del funcionamiento del laboratorio remoto.
- Fuente de alimentación *Delta Electronics Inc.*: Este dispositivo convierte corriente alterna (está directamente conectada al tomacorriente, 220V – 60 Hz) en corriente continua para las señales digitales del PLC (en la fig. 3, se puede ver el montaje del PLC y la fuente de alimentación).

En resumen, una computadora (usuario cliente), accede remotamente vía internet a otra computadora, que hace la función de servidor, con el fin de controlar el PLC para manejar cualquiera de los cuatro procesos que se han mencionado anteriormente (ver arquitectura en fig. 4), por ejemplo, controlar la bomba que a su vez puede influir en el nivel, el flujo, la temperatura o la presión del líquido.

En el presente trabajo, se han tomado los cuatro lazos de control para la asignatura de Sistemas Automáticos de Control y se ha escogido el control de nivel de un líquido en



Fig. 2 MPS®PA Compact Workstation FESTO



Fig. 3 Montaje del PLC y fuente de alimentación

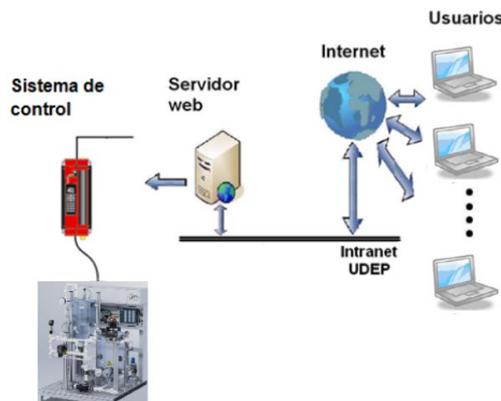


Fig. 4 Arquitectura del laboratorio remoto

para la asignatura de Control Industrial (en la fig. 5, se pueden visualizar los diagramas a lazo cerrado de la planta piloto *MPS®PA Compact Workstation*), por lo que se debe utilizar sólo los elementos concernientes a cada proceso.

### C. Arquitectura del sistema

Un sistema informático necesita de una estructura de comunicación, seguir un lenguaje en común, poder enviar y recibir datos entre los elementos. Se define también como la suma de elementos computacionales que siguen diferentes patrones con el fin de unir distintos servicios informáticos; estos elementos se comunican por medio de mensajes de solicitud y mensajes de entrega para conseguir la interacción de la información, empleando un código conocido por ambas partes.

Existen varias opciones de arquitecturas, por ejemplo, la organización o modelos por capas, filtros, sistemas jerárquicos por niveles, etc. En este tipo de proyectos, la arquitectura más usada es cliente – servidor donde la comunicación se da entre dos extremos: uno o varios clientes (usuarios finales) y uno o varios servidores (donde está almacenado todo o la mayoría del proceso).

Una computadora de propósitos generales es suficiente para funcionar como cliente, mayormente se encarga de la interacción con el usuario, donde éste determinará los requerimientos de información que son necesarios y así solicitarlos al servidor. En estas computadoras debe ser posible la ejecución y correcta visualización de interfaces que permitan al usuario manejar los datos obtenidos del proceso para poder tomar las decisiones pertinentes.

Para la función de servidor se necesita de una computadora con mayores prestaciones (procesador, memoria, disco, etc.), pues se encargará de lógica y ejecución de comandos, además, debe tener la capacidad de dar respuesta a varios clientes, los cuáles envían qué requerimientos necesitan, el servidor procesa las peticiones recibidas manejando directamente el proceso que se está controlando.

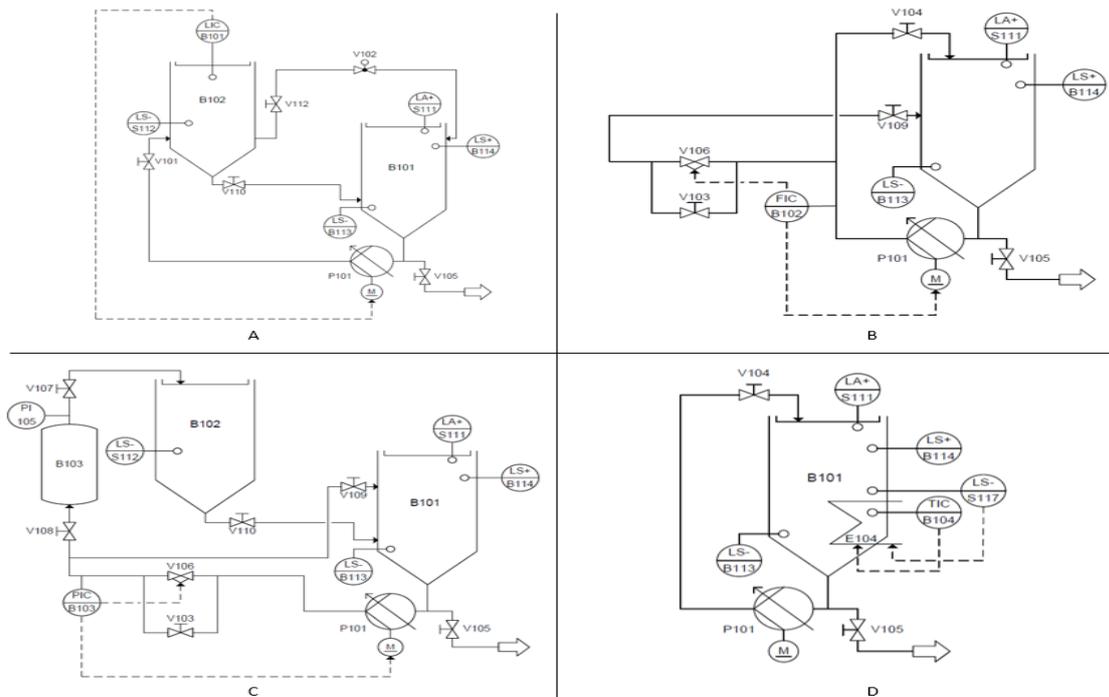


Fig.5 Diagrama de lazos cerrados:  
A) Nivel. B) Flujo. C) Presión. D) Temperatura

Para la función de servidor se necesita de una computadora con mayores prestaciones (procesador, memoria, disco, etc.), pues se encargará de lógica y ejecución de comandos, además, debe tener la capacidad de dar respuesta a varios clientes, los cuáles envían qué requerimientos necesitan, el servidor procesa las peticiones recibidas manejando directamente el proceso que se está controlando. Finalmente, la arquitectura del sistema se puede ver en la fig. 6.

#### D. Conectividad de red

Para la conectividad en una red, como Internet, se emplean protocolos, los cuales son el conjunto de reglas que dictaminan la forma de comunicación entre dos extremos.

Internet se comunica a través del protocolo TCP/IP que es la combinación entre dos protocolos: TCP e IP. La elección de este protocolo se debe a su uso extendido y sencillez [17].

Dentro del protocolo TCP/IP, se debe especificar que las direcciones IP pueden ser privadas o públicas, ambas son únicas y exclusivas de un dispositivo con acceso a Internet. Las IP privadas son empleadas para identificar un equipo dentro de una red interna o doméstica, mientras que las IP públicas sirven para poder acceder fuera de ellas. A un IP

privado le corresponde un único IP público y viceversa.

Para acceder a un dispositivo informático a través de Internet, no sólo basta saber la IP pública de éste, adicionalmente, debe tener abierto un puerto. Los puertos son numeraciones lógicas establecidas a cada extremo en una conexión informática. Los puertos pueden ser abiertos (permite la posibilidad de conexión), cerrados (rechaza la conexión) y bloqueados (no recibe respuesta).

En resumen, para poder conectarse remotamente al servidor se emplea el protocolo TCP/IP, además se debe tener un IP público y un puerto abierto.

### III. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS LABORATORIOS REMOTOS

A continuación, se describirá la elaboración del programa en DirectSOFT para el funcionamiento del PLC; también el programa en LabVIEW, el cual ha permitido la creación de la interfaz, así como algunos procedimientos que son parte del laboratorio remoto realizado; y por último, el FESTO Didatic EzOPC y el NI OPC Servers, esenciales para la conexión remota (también necesita de previa configuración).

#### A. Programación del PLC

Para el curso de Sistemas Automáticos de control, el controlador ha sido directamente la computadora a través del EasyPort, mientras que para el curso de Control Industrial se ha usado el PLC DirectLOGIC 06.

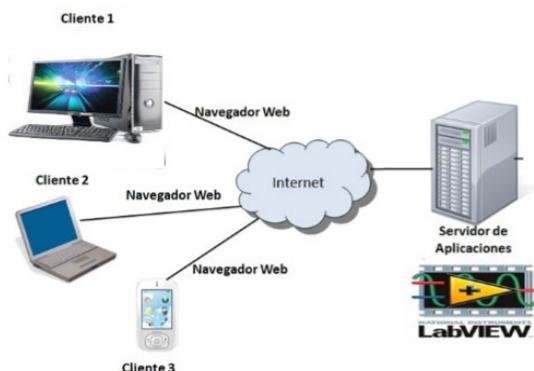


Fig. 6 Arquitectura cliente-servidor del laboratorio remoto

La configuración del EasyPort es automática cuando se conecta con la computadora a través de su servidor OPC, así que no ha necesitado mayor configuración (ver fig. 7). En lo que concierne al PLC, las tareas de control y aplicaciones que posee (se ha trabajado con el módulo opcional F0-2AD2DA-2) en su control automatizado han sido programadas en el diagrama de escalera del DirectSOFT. En la fig. 8, se puede ver que se ha creado el esquema de mando donde van los bloques que representan el proceso, además de las rutinas y subrutinas a seguir.

**B. Programación de software**

LabVIEW es el software donde se ha elaborado la plataforma remota, en especial la interfaz, mediante la cual los usuarios ven e interactúan con el laboratorio remoto, obtienen datos del proceso (nivel, voltaje, etc.), así como la forma de variación del mismo si se cambian los parámetros de funcionamiento. Además, se han configurado todas las acciones necesarias para conseguir los objetivos de este laboratorio remoto, como lo son: lazo abierto con señales de entrada estándar, sistema de control a lazo cerrado, generación de una señal PRBS, métodos paramétricos de identificación, control predictivo, comandos de control y monitoreo del módulo FESTO.

La interfaz tiene todos los elementos gráficos necesarios para el cómodo desarrollo visual del laboratorio remoto, es amigable y fácil de manejar; la interacción con los alumnos es sencilla para posibilitar un correcto procedimiento sin retrasar a los mismos; de esta manera se evitan problemas y posibles malinterpretaciones al momento de llevar a cabo el laboratorio.

Se ha usado la herramienta *case structure*, donde se pueden ejecutar varias operaciones con distintas

características, organizándolas en pestañas para evitar el cruce de información.

Para el curso de Sistemas Automáticos de control, se han creado cuatro programas, cada uno correspondiente a cada uno de los cuatro lazos (ver fig. 9). Cada uno de ellos consta de tres pestañas donde el usuario podrá operar y monitorear a lazo abierto, lazo cerrado y uno de identificación donde varía automáticamente la entrada del proceso.

Para el curso de Control Industrial, la interfaz creada consta de un conjunto de diez pestañas (las tres primeras podrían ser usadas también para el primer curso), donde se han organizado las diferentes opciones para realizar los procedimientos de los laboratorios remotos: entrada escalón, entrada pulso (lazo abierto), PID (lazo cerrado), PRBS, ARX, ARMAX, Output Error, Box-Jenkins (identificación a lazo abierto), GPC y control predictivo (lazo cerrado avanzado); además de una imagen proyectada desde una cámara web (la interfaz final del segundo laboratorio se puede ver en la fig. 10).

El enlace de datos entre el LabVIEW y el EasyPort o el

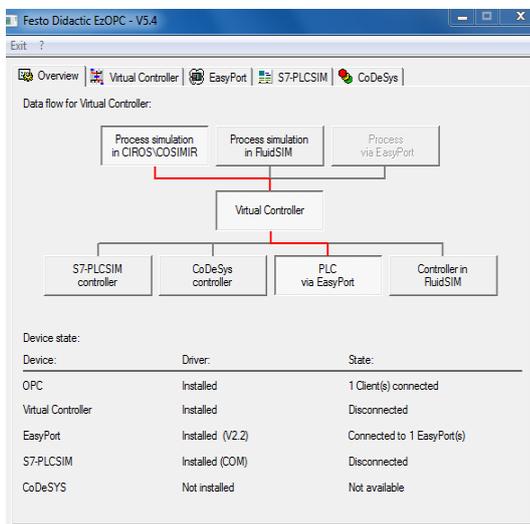


Fig. 7 Configuración de EasyPort

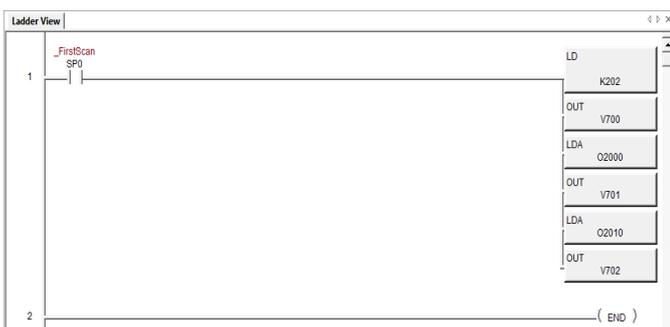
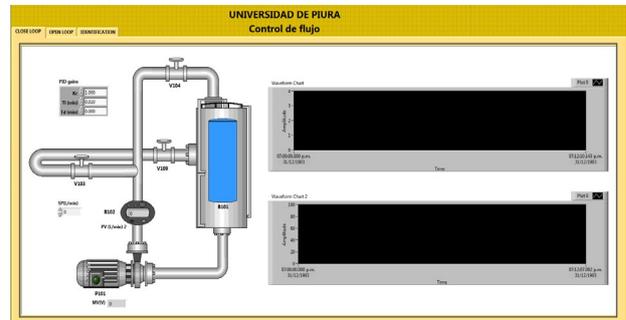
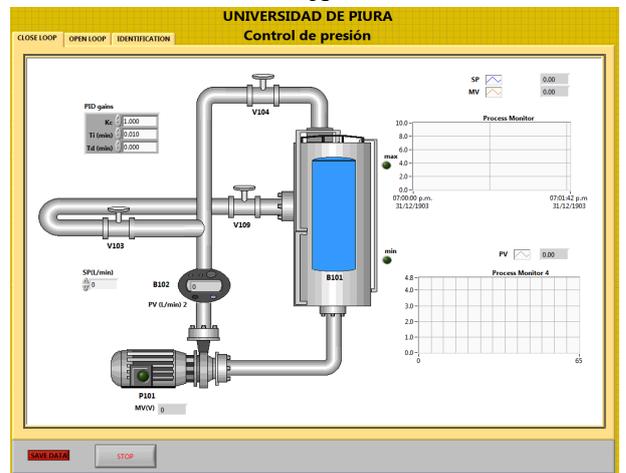


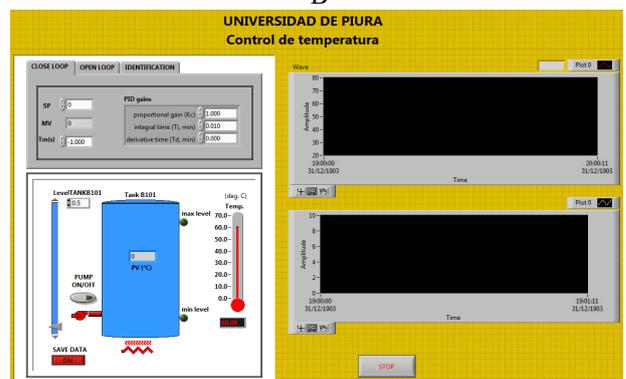
Fig. 8 Ladder View del DirectSOFT



A



B



C

Fig. 9 Interfaz en el panel frontal de LabVIEW del primer laboratorio A) Flujo. B) Presión. C) Temperatura

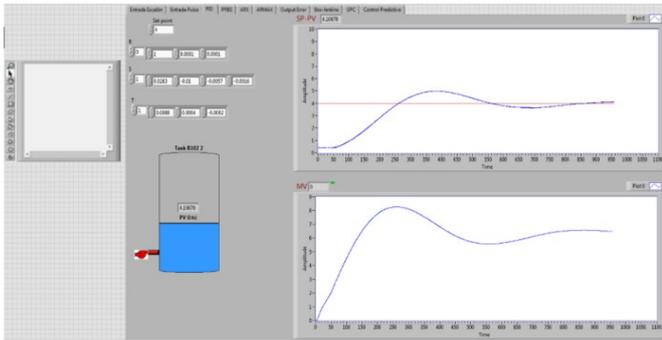


Fig. 10 Interfaz en el panel frontal de LabVIEW del segundo laboratorio

PLC se consigue al colocar las direcciones de las memorias internas de cada uno de ellos en los bloques adecuados (en ambos software) donde se leen y escriben las entradas y salidas del proceso, las cuales se transfieren mediante su respectivo servidor OPC.

### C. Desarrollo de la plataforma del usuario

Usando el lenguaje de programación *Java para Web* se ha implementado una plataforma a la cual el usuario ingresará previo al laboratorio remoto (ver fig. 11), donde el profesor o asistente del curso puede tomar una evaluación para medir el nivel de conocimientos de los alumnos, con el objetivo de asegurarse que no tendrán problemas en el desarrollo del laboratorio remoto. Además, se puede evaluar en línea, resolver consultas y evaluarlos posteriormente.

Esta plataforma no es exclusiva para laboratorios sino también tiene funcionalidades para evaluar el aprendizaje cognitivo en clase.

### D. Desarrollo de la página web

El centro de trabajo, donde está la computadora que funciona como servidor, es el laboratorio de Sistemas Automáticos de Control de la Universidad de Piura. Dicha computadora, con las suficientes prestaciones, está configurada en su conexión de red con un IP que tiene operativo un IP público para el acceso remoto, además, dentro del mismo segmento de red que el IP establecido en el PLC.

Para el acceso remoto, el usuario (cliente) accede al servidor del laboratorio remoto a través de una o varias

páginas web, ahí puede manipular los diferentes parámetros los lazos de control, pues se encuentran almacenadas las interfaces creadas anteriormente.

Para la creación de la página web, se ha usado la herramienta *Web Publishing Tool de LabVIEW* [18].

Los alumnos matriculados en el curso, pertenecen a una base de datos donde tienen asignados sus respectivos usuarios y claves para acceder a la plataforma, de acuerdo al horario brindado por el profesor del curso. Una de las características de la página web es que pueden acceder varios usuarios a ella, pero sólo uno de ellos puede tener el control del módulo FESTO.

## IV. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Gracias a la interfaz creada en LabVIEW, se puede realizar identificación del proceso así como la elaboración de algoritmos para controlar los procesos. Se debe recordar que el objetivo es más didáctico que industrial, es decir, la experimentación y resultados están orientados al aprendizaje de los alumnos sobre los temas de Automática.

En el curso de Sistemas Automáticos de Control, son cuatro las opciones de laboratorio, el alumno no desarrollaba todos, sino se escogió al azar entre el control de nivel, flujo o presión después de haber respondido su cuestionario previo en la plataforma mencionada. El último lazo de control quedaba para aquellos alumnos que tenían dificultades con la asignatura, esto es porque naturaleza del proceso de la temperatura es lento y no era conveniente para un laboratorio remoto con muchos alumnos.

A continuación, se describe con mayor detalle lo contenido en la interfaz del laboratorio del segundo curso, mostrando cómo el usuario se puede desenvolver en cada una de las opciones descritas anteriormente. Se ha elegido éste puesto que para los laboratorios del primer curso, los procedimientos a seguir se hacen de manera similar.

### A. Identificación a lazo abierto

En la primera pestaña, se ingresan valores de voltaje (variable manipulable) desde 0 a 10V; dependiendo de estos valores, la bomba va aumentando o disminuyendo su potencia, enviando más o menos agua del tanque inferior al tanque superior. Se precisa que la válvula manual V110 permanece abierta, en cierta medida, para asegurar que haya entrada y salida de líquido en el tanque superior. Los tanques superior e inferior tienen la capacidad de 10 L, sin embargo, nunca se llenan por lo mencionado anteriormente.

Para la identificación del proceso, se ha optado por el ingreso automático de los valores de voltaje, es decir, empieza en cero y luego de un determinado tiempo cambia a 1V, después del mismo tiempo cambia a 2V y así sucesivamente hasta llegar al valor de 10V.

En la fig. 12, se muestra cómo se comporta el proceso, mostrando la entrada y salida del mismo (tiempo en segundos). Estas pruebas ayudan a saber el tiempo de establecimiento, así como la función de transferencia del proceso hallando la ganancia estática y la constante de tiempo.

PREGUNTAS DE CONTROL PARA LABORATORIO I

PREGUNTAS CON ALTERNATIVAS

1. LA CONSTANTE DE TIEMPO EN UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN, SE DEFINE COMO EL TIEMPO PARA EL CUAL LA SALIDA ALCANZA EL \_\_\_\_ DE SU VALOR ESTACIONARIO.

40.2%

41.2%

46.7%

70.2%

73.2%

2. PARA DEFINIR LA PREGUNTA ANTERIOR, NO SE TOMA EN CUENTA EL TIEMPO DE RETARDO

Verdadero

Falso

3. ¿CUAL DE LOS TRES PARÁMETROS DE UNA SINTONIZACIÓN PID ESTÁ MÁS RELACIONADA CON UNA ACCIÓN PREDICTIVA?

Proporcional

Integral

Derivativo

PREGUNTAS PARA LLENAR

1. ¿QUÉ MÉTODOS CONOCE PARA SINTONIZAR UN PID? MENCIONE AL MENOS DOS.

Responder

Fig. 11 Plataforma del usuario

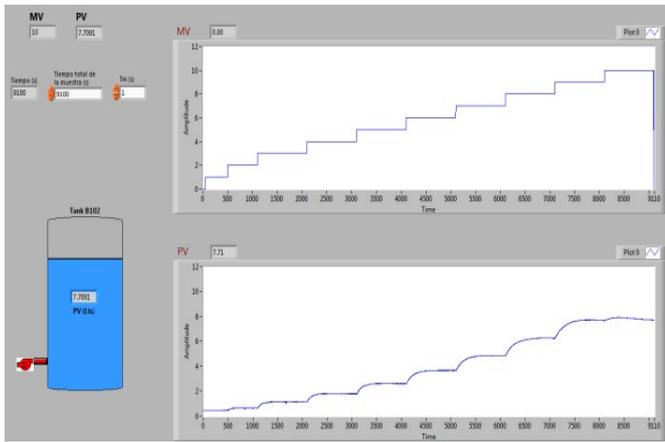


Fig 12 Entrada y salida del proceso

El método para la identificación es no paramétrico, denominado comúnmente como el método de la tangente, en el cual el sistema reacciona frente a diferentes entradas escalón (variación de uno en uno) y se puede apreciar su respuesta en estado estacionario, deduciendo la linealidad o no linealidad del sistema.

Se ha tomado al sistema como un proceso de primer orden con un posible retardo, por lo que en diferentes tramos, las funciones de transferencias son las siguientes:

$$MV=2V: P_{0.468-0.646}(L)(s) = 0.178/(42s + 1)e^{-s} \quad (1)$$

$$MV=3V: P_{0.646-1.155}(L)(s) = 0.509/(71s + 1)e^{-s} \quad (2)$$

$$MV=4V: P_{1.155-1.803}(L)(s) = 0.648/(82s + 1)e^{-s} \quad (3)$$

$$MV=5V: P_{1.803-2.612}(L)(s) = 0.809/(99s + 1)e^{-s} \quad (4)$$

$$MV=6V: P_{2.612-3.668}(L)(s) = 1.056/(129s + 1)e^{-s} \quad (5)$$

$$MV=7V: P_{3.668-4.971}(L)(s) = 1.203/(147s + 1)e^{-s} \quad (6)$$

$$MV=8V: P_{4.971-6.259}(L)(s) = 1.388/(171s + 1)e^{-s} \quad (7)$$

$$MV=9V: P_{6.259-7.707}(L)(s) = 1.448/(175s + 1)e^{-s} \quad (8)$$

Las ecuaciones halladas dan a conocer que el proceso es no lineal porque demuestran que existen diferentes ganancias estáticas y constantes de tiempo en cada tramo.

Este tipo de identificación es la más básica, es enseñada y aplicada en un curso básico de Automática.

### B. Sintonización del PID

Cuando un proceso se implementa en la industria, éste debe ser independiente y a lazo cerrado. En tal caso, se ingresa el valor del nivel del líquido, en lugar de un valor en voltaje, dependiendo de los requerimientos en un determinado instante. El nivel del líquido permanece constante a pesar de que se puedan presentar perturbaciones o cambios intempestivos en el módulo FESTO.

Para conseguir controlar el sistema a lazo cerrado, se necesita la sintonización de un PID (controlador proporcional, integrativo, derivativo), el cual es el más utilizado por su simplicidad al aplicarlo. En el presente trabajo, se ha optado por la implementación de un PID general.

Esta sintonización PID necesita el hallazgo de los tres parámetros que la definen: elemento proporcional, integral y derivativo, el método elegido para hallar dichos valores es la asignación de polos. Como el retardo es pequeño se puede eliminar de la fórmula, quedando el cálculo de la siguiente manera:

$$T(s) = C(s)P(s)/(1 + C(s)P(s)) \quad (9)$$

Donde  $C(s)$  es el controlador PID, cuya ecuación es:

$$C(s) = K + K_i/s + K_d s \quad (10)$$

Se puede elegir cualquier función de transferencia como  $P(s)$ , en este caso, se ha tomado aquella correspondiente a una entrada de 5V en la bomba, pero sin el retardo:

$$P(s) = 0.809/(99s + 1) \quad (11)$$

Por lo tanto:

$$T(s) = \frac{(K + K_i/s + K_d s)(0.809/(99s + 1))}{1 + (K + K_i/s + K_d s)(0.809/(99s + 1))} \quad (12)$$

Para asignar polos, se iguala la ecuación con una de similar estructura con el fin de hallar los parámetros del PID:

$$\frac{Num}{(as + 1)^2} = \frac{0.809Ks + 0.809K_i + 0.809K_d s^2}{(99 + 0.809K_d)s^2 + (1 + 0.809K)s + 0.809K_i} \quad (13)$$

Las siguientes igualdades resultan de (13):

$$a^2 = 99 + 0.809K_d \quad (14)$$

$$2a = 1 + 0.809K \quad (15)$$

$$1 = 0.809K_i \quad (16)$$

Al tener tres ecuaciones para cuatro incógnitas, se asume uno de los valores para luego hallar los restantes, para esto se debe analizar el proceso del módulo FESTO. Después de esto, se presume que el parámetro que mayor inestabilidad le da al proceso es "Kd" por lo que definimos este valor.

Se debe recalcar que los valores que se ingresan en la interfaz del lazo cerrado son K, Ti (K/Ki) y Td (Kd/K), los dos últimos deben ser ingresados en minutos.

Se asume, entonces un valor de Td=0.001 minutos, por lo que K=23.5048 y Ti=0.3169 minutos.

Entonces, el PID ya está sintonizado y en la fig. 13, se puede ver cómo reacciona el sistema cuando se ingresa un setpoint de 5 litros, luego de 7 litros y finalmente de 4 litros

### C. Identificación mediante una señal PRBS

En este apartado, se hace la identificación de un proceso utilizando conceptos más avanzados de Automática, como lo es el control predictivo. Se utilizan métodos paramétricos de identificación para hallar la función de transferencia de una forma rápida y eficaz.

El sistema está a lazo abierto, siendo la señal de entrada

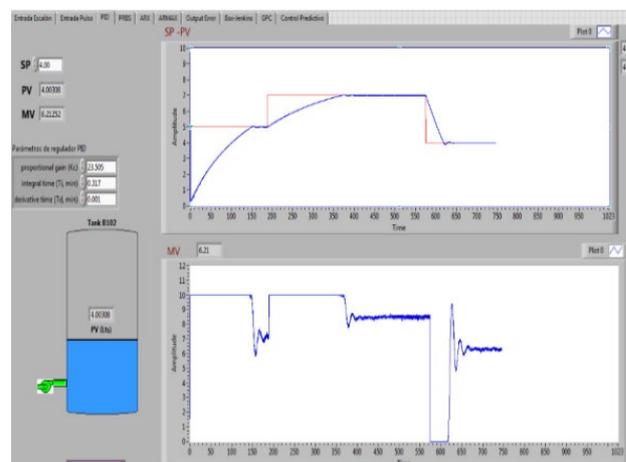


Fig. 13 Sintonización PID

una señal PRBS, la cual se ha creado empleando el software LabVIEW. Luego, se analiza la señal de salida para obtener los valores que permiten controlar el sistema a lazo cerrado con una herramienta de control análoga a la sintonización de un PID.

Para la generación de esta señal, el usuario ingresa los valores del offset y de la amplitud (los demás parámetros naturales de esta herramienta ya están en el diagrama de bloques del software), es decir, los valores de voltaje desde donde parte la señal y la diferencia hasta donde llega la señal PRBS, respectivamente.

En la fig. 14, se ha ingresado un valor de offset igual a 5 y una amplitud igual a 1, con dichos valores, se pueden apreciar las gráficas de entrada y salida del proceso.

A continuación, se hallan modelos matemáticos mediante 4 algoritmos, los cuales son métodos paramétricos de identificación [19]. Se aclara que hasta este punto se ha estado trabajando con dominios continuos, sin embargo, en adelante se describen los modelos con dominios discretos, debido a que en el control predictivo, la identificación de un proceso se hace utilizando un tiempo de muestreo.

La estructura general de un modelo paramétrico SISO (una sola entrada y una sola salida) es:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}e(t) \quad (17)$$

Donde  $y(t)$  es la salida del proceso,  $u(t)$  es la entrada del proceso,  $e(t)$  es el error del proceso y A, B, C, D, F son polinomios que se adaptan para la correcta identificación. En todos los casos, no se ha considerado el polinomio del error y el polinomio C siempre es igual a 1.

Para hallar los valores de los polinomios, con las pestañas restantes en la interfaz creada y usando el software Matlab se hallan las funciones de transferencia en continuo.

- Modelo ARX: En este modelo los polinomios C, D y F son igual a 1. Se han elegido polinomios A y B de tercer orden.

$$T(s) = \frac{0.04573s^2 - 0.0453s + 0.03696}{s^3 + 2.523s^2 + 6.987s + 0.06635} \quad (18)$$

- Modelo ARMAX: En este modelo los polinomios D y F son igual a 1. Se han elegido polinomios A y B de tercer orden y el polinomio C igual a cero.

$$T(s) = \frac{0.0141s^4 - 0.0079s^3 + 0.1266s^2 - 0.2365s + 0.201}{s^5 + 3.18s^4 + 16.46s^3 + 23.28s^2 + 37.13s + 0.3608} \quad (19)$$

- Modelo OE: En este modelo, los polinomios A, C y D son igual a 1. Se han elegido polinomios B y F de

segundo orden

$$T(s) = \frac{0.00815s}{s^2 + 0.01487s + 0.00001} \quad (20)$$

- Modelo BJ: En este modelo, el polinomio A es igual a 1. Se han elegido polinomios B y F de quinto orden y los polinomios C y D igual a cero.

$$T(s) = \frac{0.03246s^4 + 0.00049s^3 + 0.1331s^2 + 0.00045s + 0.00021}{s^5 + 0.0416s^4 + 4.057s^3 + 0.1668s^2 + 0.03731s + 0.00038} \quad (21)$$

#### D. Control predictivo

Se procede a plantear otra técnica de control alterna a los reguladores PID. Si bien es cierto, los PID tienen una gran aceptación por su fácil implementación, si se necesita algo más que sólo controlar un proceso, como reducir costos, ahorrar energía, etc. una de las opciones es el control predictivo.

En este caso, se ha elegido al GPC (*Generalized Predictive Control*), el cual es una de las estrategias más utilizadas de los MPC (*Model Predictive Control*) [20].

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (22)$$

Donde  $y(t)$  es la salida del proceso,  $u(t)$  es la entrada del proceso, “d” es el tiempo muerto del sistema mientras que A, B y C son:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (23)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{na}z^{-na} \quad (24)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{na}z^{-na} \quad (25)$$

Existen una serie de fórmulas y ecuaciones que desembocan en hallar tres parámetros R, S y T, esenciales para la configuración de la estrategia de control a lazo cerrado. Estos parámetros son hallados con la interfaz creada, específicamente en la pestaña “GPC; luego, con estos valores hallados, se elige la pestaña de “Control Predictivo” para obtener los gráficos de control.

A partir de una de las ecuaciones obtenidas en el apartado anterior o con el método de la tangente, se obtienen los valores y gráficos señalados. Para seguir con el laboratorio remoto, se puede elegir cualquiera de las funciones de transferencia encontradas, en este caso, se ha elegido la función de (5), la cual se debe transformar de tiempo continuo a discreto. Para trabajar sin el error, utilizamos la aproximación de Padé de primer orden:

$$e^{-\alpha} \approx \frac{1 - \theta/s}{1 + \theta/s} \quad (26)$$

Entonces, la función de transferencia queda:

$$P(s) = \frac{-1.05s + 2.1}{129s^2 + 259s + 2} \quad (27)$$

Transformando a tiempo discreto:  $T_s=1\text{seg}$ :

$$P(z) = \frac{0.001106z + 0.005905}{z^2 - 1.128 + 0.1343} \quad (28)$$

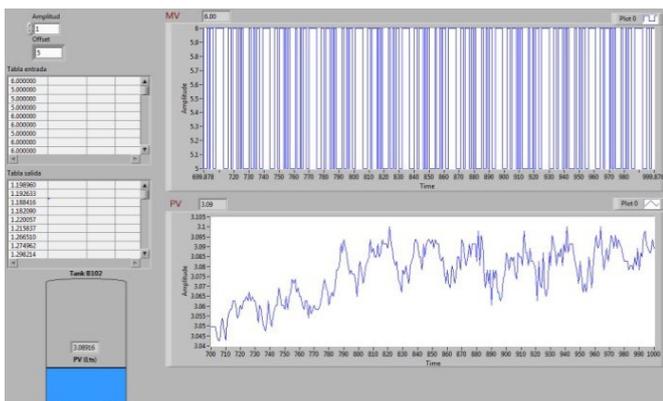


Fig. 14 Entrada con señal PRBS

En la fig. 15, se puede ver los valores obtenidos para R, S y T, considerando al numerador como BB, al denominador como AA, y C es igual a 1.

$$R = [1 \quad 0.000379] \quad (29)$$

$$S = [0.090403 \quad -0.07606 \quad 0.008641] \quad (30)$$

$$T = [0.014555 \quad 0.00743 \quad 0.000995] \quad (31)$$

Además, se brinda valores de los parámetros  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_u$ , alfa y gamma; en este caso, 1, 3, 0.9 y 1 respectivamente.

En la fig. 16, se puede ver la gráfica del control predictivo con los datos obtenidos.

Queda claro que existen muchas posibilidades al momento de establecer el control predictivo, puesto que depende del modelo que se escoja, de las simplificaciones que se hagan, de los parámetros que se elijan (horizontes de predicción, coeficientes, etc.)

Si bien uno de los objetivos de este trabajo es el control del proceso, no es necesario lograr el mejor algoritmo posible, sino la adaptación a un laboratorio remoto, optando por mostrar los resultados a los que el alumno debería llegar. Además, alineándose a los objetivos de la asignatura, el estudiante debe aprender cómo reacciona el proceso a diferentes cambios en las estrategias de control, sin llegar al control óptimo del proceso, puesto que no se cuenta con un tiempo prudente para que el alumno haga los cálculos y pruebas necesarias.

## V. EVALUACIÓN PEDAGÓGICA

Como ya se ha mencionado, una de las ventajas de los laboratorios remotos es la flexibilidad de horarios para ser llevados a cabo por los estudiantes, sin embargo, se debe analizar el impacto pedagógico en los alumnos que los realizan. Es por esta razón que se implementaron estas propuestas en las asignaturas mencionadas, siendo los resultados obtenidos medidos a través de una encuesta online basada en el estudio de [6] en el curso de Control Industrial, ya que fue el primer curso donde se pudo realizar un laboratorio remoto.

Las preguntas contenidas en dicha encuesta han seguido dos amplios temas, los cuales son:

- Visualización e interactividad: Verifica lo concerniente a la plataforma e interfaz que los alumnos han visto en el laboratorio remoto.
- Perspectiva pedagógica: Se refiere a la percepción de los estudiantes frente a esta alternativa de laboratorio, además si es útil en su aprendizaje.

En la tabla I, se puede apreciar las preguntas hechas a los alumnos respecto del laboratorio remoto realizado;

TABLA I  
CUESTIONARIO DE LA ENCUESTA ONLINE

Visualización e Interactividad	
- La interfaz de la plataforma Web para laboratorios remota es adecuada.	
- Es cómodo usar la plataforma remota Web.	
- Disfruté utilizando la interfaz Web durante la práctica experimental.	
- La interfaz de la plataforma Web remota es fácilmente accesible y manejable.	
- Se requiere mucho esfuerzo para llevar a cabo el laboratorio remoto través de la interfaz Web.	
Perspectiva pedagógica	
- Las instrucciones indicadas en la guía de trabajo de laboratorio son suficientes.	
- Los laboratorios remotos me permiten entender mejor el curso.	
- Los laboratorios remotos motivan a aprender más sobre los temas de control automático.	

TABLA II  
RESULTADOS DE LA ENCUESTA ONLINE (PORCENTAJES)

Tema	Visualización e interactividad	Perspectiva pedagógica
Muy de acuerdo	13.04	23.19
De acuerdo	61.74	47.83
Neutro	19.13	25.36
En desacuerdo	6.09	2.9
Muy en desacuerdo	0	0.72

mientras que en la tabla II, se muestra el cuadro resumen de las preguntas del cuestionario, donde 46 alumnos han respondido bajo los criterios de muy de acuerdo, de acuerdo, neutro, en desacuerdo y muy en desacuerdo.

El cuadro resumen permite saber que cerca del 75% de los alumnos creen que la plataforma e interfaz creadas son adecuadas para un buen laboratorio remoto, mientras que cerca del 6% opina lo contrario. Por otro lado, cerca del 71%, opina que el laboratorio remoto creado, es una muy buena alternativa para consolidar los conocimientos brindados en las clases teóricas, no obstante, cerca del 4% cree que no es así.

## VI. CONCLUSIONES

Se ha expuesto una propuesta real para la aplicación de los conocimientos impartidos en las asignaturas del área de Automática, tanto a un nivel básico como a uno un poco más complejo. La posibilidad de ver cómo reacciona el proceso ante el cambio de los valores de entrada, la respuesta del sistema en un lazo cerrado frente a la sintonización de un PID o de un control más avanzado como el control predictivo, y todo lo realizado en este estudio, complementa y permite entender muchos conceptos teóricos.

Se ha logrado controlar el nivel, el flujo, la presión y la temperatura en la Compact Workstation FESTO a través de Internet, de esta manera los estudiantes podrán practicar desde la comodidad de su casa o desde cualquier lugar, sin necesidad de regirse a los horarios de funcionamiento de la universidad.

Los futuros ingenieros se van familiarizando con procesos reales, instrumentos y equipos de la industria, entendiendo su funcionamiento y la forma de programarlos y manejarlos.

Los software utilizados han dado buenos resultados y cumplen con el objetivo del presente trabajo, en especial LabVIEW, donde se ha desarrollado la plataforma. Este programa informático es de vital importancia porque permite al estudiante el acceso y la manipulación de la

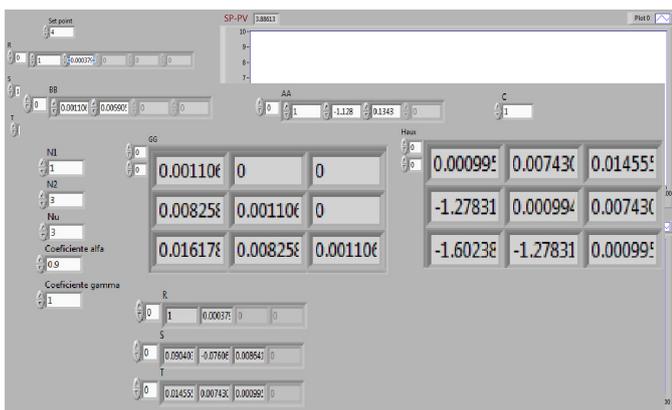


Fig. 15 GPC

estación de trabajo FESTO, instalada en el laboratorio de Sistemas Automático de Control de la Universidad de Piura.

El módulo FESTO tiene la robustez y seguridad necesaria para ofrecer la flexibilidad de horarios e independencia de un trabajo adecuado del usuario, de esta manera puede considerarse como una muy buena alternativa de solución frente a las dificultades presentes en los laboratorios tradicionales y/o presenciales, como las restricciones de tiempo, lugar, equipos y personal idóneo.

La encuesta realizada demuestra los buenos resultados de la aplicación de un laboratorio remoto en el curso de Control Industrial, tanto en los aspectos de visualización e interactividad, así como en la perspectiva pedagógica, puntos importantes para el tema abordado. Aunque, en el curso de Sistemas Automáticos de Control no se logró pasar la misma encuesta o una mejorada, la respuesta de los estudiantes frente a esta metodología fue positiva. Se espera que este año se puedan aplicar nuevamente y medir los resultados en los estudiantes.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Domínguez, J. J. Fuertes, M. A. Prada, S. Alonso, A. Morán and P. Barrientos, "Education on automatic control for professionals through the LRA-ULE remote laboratory," in *Proc. 10<sup>th</sup> IFAC Symposium Advances in Control Education*, Sheffield, 2013, pp. 90–95.
- [2] J. J. Fuertes, S. Alonso, A. Morán, M. A. Prada, S. García and C. Del Canto, "Virtual and remote laboratory of a DC motor," in *Proc. 9<sup>th</sup> IFAC Symposium Advances in Control Education*, Nizhny Novgorod, 2012, pp. 288–283.
- [3] I. Ruano, J. Gámez and J. Gómez, "Laboratorio Web SCORM de control PID con integración avanzada," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 13, no. 4, pp. 472–483, 2016.
- [4] E. Lindsay, S. Murray and B. D. Stumpers, "A toolkit for remote laboratory design & development," in *IEEE Global Online Laboratory Consortium Remote Laboratories Workshop (GOLC)*, pp. 1–6, October 2011.
- [5] P. Orduña, L. Rodríguez-Gil, I. Angulo, O. Dziabenko, D. López-de-Ipiña and J. García-Zubia, "Exploring students collaboration in remote laboratory infrastructures," in *IEEE Remote Engineering and Virtual Instrumentation 9<sup>th</sup> International Conference on*, pp. 1–5, 2012.
- [6] P. Orduña, P. H. Bailey, K. DeLong, D. López-de-Ipiña and J. García-Zubia, "Towards federated interoperable bridges for sharing educational remote laboratories," *Computers in Human Behavior* vol. 30, pp. 389–395, 2014.
- [7] Z. German-Sallo, H. S. Grif and A. Gligor, "Technical evaluation of remote laboratories in an engineering educational network," *Procedia Technology*, vol. 19, pp. 1136–1141, 2015.
- [8] R. Heradio, L. de la Torre and S. Dormido (2016). Virtual and remote labs in control education: A survey. *Annual Reviews in Control*, 42, 1–10.
- [9] L. Gomes and S. Bogosyan, "Current trends in remote laboratories," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 12, pp. 4744–4756, December 2009.
- [10] F. De La Cruz, M. Díaz-Granados, S. Zerpa and D. Giménez, "Web-LABAI: Laboratorio remoto de automatización industrial," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7, no. 1, pp. 101–106, 2010, January 2010
- [11] E. Fabregas, G. Fariás, S. Dormido-Canto, S. Dormido and F. Esquembre, "Developing a remote laboratory for engineering education," *Computes & Education*, vol. 52, no. 2, pp. 1686–1697, 2011.
- [12] F. Esquembre, "Facilitating the creation of virtual and remote laboratories for Science and Engineering education," *IFAC PaperOnLine* vol. 48, no. 29, pp. 49–58, 2011.
- [13] Z. German-Sallo, H. S. Grif and A. Gligor, "Functional suitability analysis of remote laboratories in an engineering educational network," *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 1169–1175, 2016.
- [14] A. Lorandi, G. Hermida, J. Hernández and E. De Guevara, "Los laboratorios virtuales y laboratorios remotos en la enseñanza de la Ingeniería," *Revista Internacional de Educación en Ingeniería*, vol. 4, pp. 24–30, 2011.
- [15] C. Ariza and D. Amaya, "Laboratorio remoto aplicado a la educación a distancia," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 18, no. 2, pp. 131–145, 2008.
- [16] J. Valdiviezo, W. Ipanaqué, J. Soto and I. Belupú, "Control remoto de planta piloto Compact Workstation FESTO en el marco del desarrollo de laboratorios remotos", *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion"*, vol 16, 2018.
- [17] J. M. Andújar and T.J. Mateo, "Diseño de laboratorios virtuales y/o remotos. Un caso práctico," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7, no 1, pp. 64–72, January 2010.
- [18] C. S. Peek, O.D. Crisalle, S. Dépraz and D. Gillet, "The virtual control laboratory paradigm: Architectural design requirements and realization through a DC motor example," *International Journal of Engineering Education*, vol. 21, no. 6, pp. 1134–1147, 2005.
- [19] W. Ipanaqué, Control automático de procesos. Innovando los procesos productivos, Universidad de Piura, 2012.
- [20] W. Ipanaqué, Control predictivo, una técnica para el futuro de la industria, Universidad de Piura, 2005.

**Juan Valdiviezo Espinoza** Ingeniero Mecánico – Eléctrico por la Universidad de Piura, Perú (2016). Docente a tiempo completo de la Universidad de Piura, Perú desde el año 2014. Actualmente estudia la maestría de Ingeniería Mecánica – Eléctrica con mención en Automatización y Optimización en la Universidad de Piura. Los temas de investigación son Control Automático de Procesos Industriales, laboratorios remotos, sistemas lineales y no lineales.

**William Ipanaqué Alama** Doctor en Ingeniería Informática y Automática por el Politécnico de Milán (Italia). Sus campos de investigación son el control automático, optimización y automatización de procesos y tecnologías emergentes. Fundador y director de la Maestría Mecánico-Eléctrica con mención en Automática y Optimización de la UDEP. Ha desempeñado labor como miembro del Consejo Consultivo del Congreso de la República de la comisión de Ciencia, Innovación y Tecnología; miembro del Comité Regional (Piura) de Ciencia, Tecnología e Innovación; Vicepresidente del Grupo Estratégico regional (Piura) de Ciencia, investigación e innovación. Por su trabajo en investigación tecnológica, en el año 2015 fue reconocido con la orden del mérito Santiago Antúñez de Mayolo Gamero y en el 2014 recibió un reconocimiento de parte del Concytec para el grupo de trabajo de sistemas automáticos de control que dirige en la UDEP.

**Juan Soto Bohórquez** Ingeniero Mecánico - Eléctrica de la Universidad de Piura, Perú, en el año 2013; ha realizado una Maestría con mención en Eficiencia Energética en la Universidad de Piura, 2014. Actualmente es investigador de la Universidad de Piura; autor de papers sobre Sistemas Embebidos, Control Automático de Procesos Industriales, Procesamiento de Imágenes. Participa en proyectos I+D+i con fondos de programas de INNOVATE PERÚ y CONCYTEC; posee registros de propiedad intelectual (Derechos de Autor y Patente de Invención). Ha realizado pasantía en el Laboratorio de Teledetección Cuántica QUantaLab del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en el año 2015. Una pasantía en Laboratorio de Robótica y Automática de la Universidad Politécnica de Madrid, en el año 2016.

**Iván Belupu Amaya** Analista y Programador de Sistemas, Ingeniero Industrial, Áreas de Investigación: Sistemas embebidos, Tecnologías de la Información y Comunicación, Internet de las cosas, arquitecturas en sistemas informáticos a distancia para monitoreo remoto. Desarrollador de Software en lenguajes Java de escritorio, Java para Web, CSharp, .NET, Sistemas SCADA utilizando herramientas de código abierto, desarrollador de aplicaciones móviles. Autor de publicaciones en eventos internacionales. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con el sector Agrícola y Pesquero