
Asistencia en Investigación y Desarrollo en Módulo de Sistema de Tanques en Serie

Juan Pablo Ramirez Franco

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Directora: Norha Ligia Posada Restrepo

Nombre: Juan Pablo Ramirez Franco

Título profesional: Ingeniero Electrónico

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Eléctrica-Electrónica
Programa de Ingeniería Electrónica
Medellín
2015**

Dedicatoria

A ...

*Todas aquellas personas que con su esfuerzo lograron transmitirme sus conocimientos,
los cuales han sido un gran aporte para mi vida,
como también para la realización de este proyecto.*

*Todos aquellos que con palabras de ánimo
me ayudaron a tener la voluntad y la fuerza para lograr este objetivo.*

Agradecimiento

A Dios por ser mi guía espiritual, por llenarme de tranquilidad y paciencia durante el desarrollo del proyecto.

A mis padres por brindarme apoyo continuo, dándome siempre palabras de ánimo para continuar y cumplir mis objetivos. Ellos siempre serán mi ejemplo a seguir y gracias a ellos soy la persona que soy. A mis hermanas y mi hermano que siempre creyeron en mí y siempre estuvieron en disposición de brindarme su ayuda para el cumplimiento de todos mis objetivos. Toda mi familia ha sido un gran apoyo durante toda la carrera.

A la directora del proyecto Norha Ligia Posada quien siempre creyó en mí, y me brindo todo su apoyo además de mucha paciencia y dedicación para lograr este objetivo.

A la empresa Stratos Group la cual me brindó apoyo incondicional y tuvieron mucha paciencia conmigo durante la ejecución del proyecto.

A los diferentes profesores de la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UPB quienes aportaron con su conocimiento y dedicación a formarme como estudiante y profesional. Principalmente agradecer al profesor Manuel Betancur quien siempre estuvo pendiente del avance del proyecto y solucionó todas mis inquietudes a tiempo. También debo agradecer al profesor Hernan Valencia por dedicar un tiempo para la revisión y corrección de algunos temas del proyecto.

A todos mis compañeros de la carrera por apoyarme siempre, pero principalmente a Maria Elisa Briñon, Jose David Alcaraz, Paula Andrea Restrepo y Jessica Baez quienes estuvieron durante el desarrollo del proyecto aportando conocimientos, dedicación y esfuerzo para el cumplimiento de este objetivo tan importante para mi vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. ESTADO DEL ARTE.....	12
2. REPORTE DEL ESTADO INICIAL DE LA PLANTA	15
2.1. Primera etapa: Selección de componentes y diseño virtual.....	15
2.2. Segunda etapa: Construcción de la planta	18
2.3. Tercera etapa: Ajuste, calibración y puesta a punto de la máquina.....	20
3. AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE CONTROL.....	21
3.1. Calibración del transmisor de nivel.....	21
3.2. Calibración del transmisor de flujo	22
3.3. Calibración del Posicionador electro-neumático de la válvula	25
3.4. Ajuste del Variador de frecuencia	28
4. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PLC-PC	29
4.1. Protocolo TCP	30
4.2. Selección del Servidor y el Cliente	32
4.3. Implementación del Servidor	32
4.4. Implementación del Cliente.....	34
4.5. Enlace Cliente-Servidor.....	35
5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	37
5.1. Etapa de cuantización y comunicación en el PLC.....	38
5.2. Etapa de control y almacenamiento – PC con LabVIEW®	41
6. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADOR PID.....	46
6.1. Definición de la configuración del proceso en el Módulo	46
6.2. Obtención de la curva estática y definición de la zona lineal.....	47
6.3. Modelado de la planta	48
6.4. Selección de la estructura del controlador PID	50
6.5. Sintonización del controlador para la obtención de las constantes	51
6.6. Pruebas del controlador	52
6.7. Sintonización por método de tanteo	55
7. CONCLUSIONES	58
8. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS.....	60
REFERENCIAS	61
AUTOR	62

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama conceptual de la planta.....	16
Figura 2. Diseño final en herramienta CAD	17
Figura 3. Instrumentación instalada en el módulo	21
Figura 4. Niveles mínimo y máximo configurados en los tanques.....	22
Figura 5. Señal de indicación de la dirección de flujo del transmisor	24
Figura 6. Forma de la señal 4-20 mA configurada	24
Figura 7. Rótulo del sensor Siemens instalado	25
Figura 8. Ubicación del imán frente al Posicionador para un punto de carrera de la válvula	26
Figura 9. Tipos de configuraciones del recorrido de la válvula.....	27
Figura 10. Características de la válvula	27
Figura 11. Diagrama de distribución en la planta	29
Figura 12. Conexión TCP entre diferentes equipos	31
Figura 13. Negociación en tres pasos entre Cliente y Servidor TCP.....	31
Figura 14. Diagrama de bloques de la aplicación Servidor en LabVIEW®.....	33
Figura 15. Bloque “TSEND” usado en la aplicación en TIA Portal V12®.....	35
Figura 16. Bloque “TRCV” usado en la aplicación en TIA Portal V12®	35
Figura 17. Conector RJ-45 usado para la comunicación TCP	36
Figura 18. Implementación sistema DAQ en el Módulo de Sistemas de Tanques en Serie.....	38
Figura 19. Bloque “Scale_current_input” usado para leer las entradas analógicas en el PLC	39
Figura 20. Bloque “Scale_current_output” usado para generar la señal 4-20 mA para controlar el EFC	39
Figura 21. Diagrama de flujo de la máquina de estados para realizar el almacenamiento de datos	41
Figura 22. Forma de archivos de texto de almacenamiento.....	44
Figura 23. Interfaz gráfica de la aplicación de LabVIEW® diseñada	45
Figura 24. Vertederos diseñados para la planta	47
Figura 25. Curva estática de la planta	48
Figura 26. Respuesta del sistema ante escalones de subida y bajada	49
Figura 27. Respuesta del sistema ante un escalón de subida	49
Figura 28. Respuesta del modelo y respuesta real ante un escalón	49
Figura 29. Diagrama de bloques de controlador PID ideal y paralelo.....	50
Figura 30. Diagrama de bloques de controlador PID serie.....	51
Figura 31. Método de ZN implementado.....	51
Figura 32. Interfaz gráfica de la aplicación para la implementación del control PID	53
Figura 33. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de subida sintonizado por ZN	54
Figura 34. Respuesta del EFC ante un escalón de subida sintonizado por ZN.....	54
Figura 35. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de bajada sintonizado por ZN	54
Figura 36. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de bajada sintonizado por ZN	54
Figura 37. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de subida sintonizado por tanteo.....	56
Figura 38. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de subida sintonizado por tanteo.....	56
Figura 39. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de bajada sintonizado por tanteo.....	56
Figura 40. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de subida sintonizado por tanteo.....	57

Glosario

Actuador: Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en una acción o efecto sobre un proceso (Vildósola, 2008).

Algoritmo de control: Estrategia de control que rige el comportamiento de un controlador (Gerardo, 2006).

Automatización: Proceso en el que se convierte un trabajo manual a un trabajo realizado por una máquina, planta o equipo, los cuales realizan el trabajo de manera autónoma y controlada (Almazán, 2009).

Bases de datos: Conjunto estructurado de datos que se almacenan en un sistema informático y sobre el que se puede añadir, eliminar, modificar o borrar información.

Computador: El computador o PC, por sus siglas en inglés de *Personal Computer*, es una máquina electrónica encargada de recibir y procesar datos, además de almacenarlos, recuperarlos y transmitirlos. Está compuesta por una unidad principal de procesamiento, una memoria y diferentes periféricos.

Conversor Análogo Digital (*Analog Digital Converter ADC*): Equipo encargado de convertir una señal analógica a una señal digital. Este proceso se hace para que el computador capte la información (Ogata, 1996).

Conversor Digital Análogo (*Digital Analog Converter DAC*): Equipo encargado de convertir una señal digital a una analoga. Este equipo se usa para enviar una señal continua al actuador del sistema (Ogata, 1996).

Ethernet: Estándar de transmisión de datos que se basa en un protocolo por CSMA/CD (del inglés *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*) que significa que es un protocolo de acceso múltiple que monitorea la portadora: detección de portadora y detección de colisiones.

Frecuencia de voltaje: Se refiere al número de veces que se repite el ciclo de la onda senoidal de voltaje en un segundo.

Hardware: Es el conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen un computador o una planta.

Instrumentación: Elementos instalados en una planta que se encargan de medir, convertir, transmitir, controlar y registrar las variables involucradas dentro de un proceso.

Interfaz HMI: Del inglés *Human Machine interface*. Interfaz Humano-Máquina que permite el monitoreo y manipulación de las diferentes variables de un proceso, permitiendo al usuario interactuar con la planta.

Lazo Abierto: Sistema en el que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (Núñez, 2007).

Lazo Cerrado: Sistema en el que la variable de salida (variable controlada) se opera con un *set point* o referencia para luego ingresar al control, generando un efecto sobre la acción de control (Núñez, 2007).

LCD: Del inglés *Liquid-Crystal Display*. Pantalla electrónica de cristal líquido, delgada y plana. Es usada en dispositivos de bajo consumo ya que utiliza pequeñas cantidades de energía eléctrica.

Microprocesador: Elemento que se encarga de procesar la información y de ejecutar las instrucciones programadas.

Motor eléctrico: Máquina que transforma la energía eléctrica en movimiento rotacional.

PID: Algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo. Se clasifica como un algoritmo de control clásico, el cual depende de tres parámetros que definen el comportamiento de éste (Núñez, 2007).

Planta: Instalación donde se realiza un proceso industrial (Núñez, 2007).

PLC: Del Inglés *Programmable Logic Controller*. Son dispositivos electrónicos usados en las industrias para la automatización de procesos.

Proceso: Conjunto de acciones que actúan en un sistema para transformar, transportar, o almacenar materia, energía o información (Gerardo, 2006).

Potencia de procesamiento: Capacidad de un equipo para realizar los cálculos de procesamiento de las instrucciones programadas.

Retroalimentación: Retorno de parte de la energía o de la información de salida de un circuito o un sistema, a su entrada.

Robustez: Característica de un equipo, que lo define como rígido, firme o con fortaleza, además que es compacto y su funcionalidad no se ve muy afectada por factores externos y perturbaciones del proceso.

Sensor: También llamado transductor. Dispositivo que se encarga de medir un fenómeno físico.

Señales analógicas: Señal continua en el tiempo (National Instruments, s.f.).

Señales digitales: Señal discreta o discontinua en el tiempo (National Instruments, s.f.).

Set point: Valor en el que se desea mantener la variable controlada de un proceso.

Sistema: Combinación de componentes que actúan en conjunto para cumplir un objetivo específico o determinado.

Sistema DAQ: Del inglés *Data Acquisition*. Sistema encargado de recopilar la información tomada por los sensores y enviarla mediante un protocolo de comunicación a un computador el cual se encarga de almacenar y usar ésta información.

Sintonización: Ajuste del comportamiento de un sistema a uno determinado.

Software: Es el conjunto de programas y rutinas que permiten al procesador realizar las tareas asignadas.

Transmisor: Son instrumentos que captan la variable de un proceso por medio del sensor, y la transmiten a otro instrumento receptor, indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. La señal que se transmite puede ser neumática, electrónica, digital, hidráulica y telemétrica (National Instruments, s.f.).

Variable Controlada: Es la variable correspondiente a la condición que se mide y se controla, en la mayoría de los casos, corresponde a la salida del sistema (Núñez, 2007).

Variable Manipulada: Es la variable de la planta que se modifica con el objetivo de influir sobre la variable controlada mediante la dinámica de la planta (Núñez, 2007).

Resumen

El trabajo de grado presentado en este documento corresponde al proceso de asistencia en investigación y desarrollo del Módulo de Sistema de Tanques en Serie ubicado en los laboratorios de operaciones unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Dentro de este proceso se debe realizar la puesta a punto de la máquina, con el objetivo de dejarla operativa para uso de docentes y estudiantes de pregrado y posgrado de la institución. La puesta a punto de la máquina se llevará a cabo realizando procesos de revisión eléctrica, levantamiento de planos, calibración de la instrumentación, y desarrollo de aplicaciones de lectura y comunicación de los actuadores, transmisores y elementos de control.

Además, se realizará la implementación de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) que será sintonizado mediante diferentes métodos. Los resultados de las pruebas serán expuestos y analizados para determinar el controlador con mejor comportamiento. *Copyright © UPB 2013*

Palabras clave: Módulo de tanques en serie, calibración de instrumentación, sintonización de controladores PID

Abstract

The degree project done in this document pretends to detail the assistance process in investigation and Series Tank System module development, which is located in UPB's unit operations lab. Within this project, it must be made machine's fine tuning in order to make it useful for degree and post-degree students and teachers. Machine's fine tuning will be made with electrical revision processes, surveying, instrumentation calibration, and development of reading applications, and actuators, transmitters and control elements communication.

Also, a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is going to be implemented and it will be tuned by different means. Test results are going to be exposed and analysed in order to determine the controller with a best behaviour. Copyright © UPB 2013

Key words: Series Tank module, instrumentation calibration, PID controller tuning.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de plantas y módulos que simulen procesos industriales es de interés en la educación de ingenieros, puesto que permite afianzar sus conocimientos en los diferentes procesos industriales. También permite el entrenamiento y capacitación de los estudiantes para diseñar y sintonizar controladores y así lograr un mejor desempeño de éstos a nivel industrial, buscando mejorar la sintonización de los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) generalmente utilizados a nivel industrial, puesto que alrededor del 80 % de estos no trabajan de manera adecuada, donde el 25 % usan los valores de fábrica de los parámetros del controlador y un 30 % funcionan de modo manual (O'Dwyer, 2006). Por otro lado, fomentan en las instituciones educativas y en la industria el desarrollo de proyectos de investigación e innovación.

Por este motivo, la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), sede Medellín, tiene instaladas varias plantas piloto en sus laboratorios, y una de ellas corresponde a un sistema de tanques en cascada usado para simulación de flujo y almacenamiento de agua e implementación de diferentes controladores. La primera planta existente fue construida hace más de 25 años y la instrumentación que tenía era antigua y obsoleta, motivo por el cual la universidad, con el apoyo financiero del Centro de investigación para el Desarrollo y la Innovación -CIDI- y la dirección de Laboratorios de la UPB, apoyó el diseño, construcción y puesta a punto de un módulo de tanques en serie que cumpliera con los mismos objetivos

de la planta anterior, pero que además usara tecnología de última generación que permitiera a la planta estar a la vanguardia, además posibilitar la implementación de controladores más avanzados, ampliando así su uso a los estudiantes de posgrado.

La implementación de esta planta en la UPB ha fomentado en estudiantes y docentes el desarrollo de proyectos en diferentes áreas de la ingeniería para el diseño, construcción y puesta a punto de este módulo, gracias a que en este proyecto intervinieron algunos estudiantes de pregrado y postgrado. La construcción de la planta nueva comenzó en el año 2013 por algunos estudiantes de pregrado de ingeniería mecánica, quienes realizaron la construcción de sus componentes mecánicos. En diciembre de 2013, el grupo de Automática y Diseño (A+D) asignó un estudiante de maestría en Automática para realizar la instalación eléctrica y la instrumentación. Al culminar las actividades mencionadas, la planta aún no estaba lista para ser usada para trabajos de docencia e investigación, pues aún requería de diferentes tareas y trabajos importantes para la integración de los elementos mecánicos con los electrónicos que la componen.

Por lo tanto, el grupo A+D de la UPB asignó el presente proyecto con el objetivo de dejar la planta operativa y permitir su uso por las diferentes áreas de la UPB. Las actividades necesarias para cumplir los objetivos son descritas en este documento.

1. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, el término “sistemas de control” se define como la automatización y programación de procesos mediante el uso de un computador o de una herramienta digital, la cual permite el control en tiempo real haciendo uso de sensores y actuadores. Esta definición no está mal, pero no abarca el amplio mundo de los sistemas de control, debido a que este concepto se ha venido desarrollando en el tiempo, pues su existencia se remonta incluso a años antes de Cristo, donde se usaban sistemas mecánicos (poleas y cuerdas) y fuentes de poder artificiales (como vapor de agua) para producir acciones repetitivas simulando el movimiento de un motor eléctrico actual, y logrando replicar procesos que hoy en día son realizados por máquinas (Universidad de Zaragoza - Area de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2001).

En el siglo XVIII se dio un gran avance cuando James Watt inventó la primera máquina a vapor y su sistema de control, basándose en el primer regulador por flotación inventado por Polzunov años atrás. A partir de este año, diferentes científicos comenzaron a investigar y desarrollar métodos de control y su comportamiento en todo tipo de aplicaciones (Universidad de Zaragoza - Area de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2001).

En la segunda década del siglo XX, Nicolas Minorsky desarrollo un estudio de los controladores regulados basados en tres términos variables, control PID, el cual sería usado para optimizar el uso del timón en un buque. En 1923, sus estudios fueron probados en el

buque “Nuevo México” obteniendo resultados totalmente satisfactorios, por lo que se plantea que éste hombre fue el creador del primer sistema de control automático (Bennet, Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships, 1984). A pesar de tener éxito en sus estudios, los controladores PID no fueron implementados hasta 1939, cuando *Taylor Instrument Company* implemento su primer controlador PID con tres términos variables para uso general (Bennet, Development of the PID Controller, 1993).

Luego, debido al gran avance tecnológico, y con él, el de los elementos de control, medición y actuación, el control automático industrial se volvió muy importante, llegando al punto de lo que algunos autores llaman la segunda revolución industrial, debido al cambio experimentado por la industria a causa del uso de sistemas autómatas que poco a poco fueron, y seguirán reemplazando los procesos realizados por el humano (Abarca, s.f.).

Una de las ventajas principales del uso de sistemas automáticos de control, es que permite a las empresas e industrias reducir costos asociados a la generación de bienes y servicios, además de lograr un incremento importante en la calidad y volúmenes de producción (Abarca, s.f.).

Como se mencionó anteriormente, el primer controlador automático fue un controlador PID, por lo tanto, la estructura de este controlador se convirtió en un estándar, haciendo que esta sea la más usada en la industria, controlando más del 95 % de los

procesos en lazo cerrado, y la mayoría de ellos, usados como controladores PI, debido a que es simple y no requiere de alto procesamiento de la máquina para sus operaciones (Aström & Hägglund, 1995). Aunque en las últimas dos décadas se han desarrollado métodos de control avanzados, estos han sido poco implementados ya que los controladores PID están en capacidad de controlar los diferentes procesos industriales (IS_PID, 2011). A pesar de estar presentes en un gran porcentaje de la industria, los controladores PID no son explotados en todas sus características, ya que casi el 80 % de estos están mal sintonizados, de los cuales el 25 % usa los parámetros de fábrica, y un 30 % funcionan de modo manual, muy probablemente debido a la falta de comprensión y estudio en la teoría de control (O'Dwyer, 2006).

A medida que la tecnología avanzaba, la manera de implementar los controladores PID también experimentaba cambios importantes. Inicialmente estos eran controladores neumáticos, luego pasaron a ser controladores eléctricos analógicos (dispositivos con relé) y por último eran manejados por sistemas electrónicos que permitieron a los controladores avanzar en flexibilidad, velocidad y tamaño. Debido a estos cambios, los controladores debieron pasar de la toma de datos analógica, a la digital para poder ser comprendida por los sistemas digitales, como los microprocesadores, lo que hizo necesario la implementación de sistemas de muestreo y cuantización para obtener esta señal. Para realizar este tratamiento existen componentes y equipos electrónicos adecuados, algunos de ellos son los denominados sistemas de adquisición de datos (o sistema DAQ por sus siglas en

inglés *Data Acquisition*) debido a que su función es recopilar la información de los sensores y actuadores del sistema para facilitarle al usuario/operario el acceso a la información de la planta. El sistema DAQ es encargado de realizar el tratamiento a las señales mediante los siguientes procesos:

- Muestreador y retenedor (*sample and hold S/H*): Mantiene la señal analógica en un valor constante durante un tiempo.
- Conversor análogo digital (ADC): Conocido también como codificador, convierte la señal analógica en una señal codificada numéricamente, entendible para un procesador.
- Conversor Digital Análogo (DAC): Conocido también como decodificador, convierte una señal digital (codificada numéricamente en una señal analógica) (Ogata, 1996).

En este proyecto, el cual representa un control de una planta a escala y en el que se usó instrumentación industrial, se seleccionó un controlador Lógico Programable o PLC (*Programmable Logic Controller* por sus siglas en inglés) Siemens S7-1200 (descrito en el Anexo 1) como sistema DAQ.

Debido al gran uso de los controladores PID a nivel industrial, las universidades deben dar a sus alumnos bases importantes en la sintonización y funcionamiento de los controladores PID, y así educar ingenieros con capacidad de programar, construir y sintonizar diferentes sistemas de control para la industria. Una manera eficaz para fomentar este aprendizaje, es con el uso de plantas piloto, o plantas a escala, las cuales permiten a los docentes

enseñar a sus alumnos el comportamiento real de los procesos industriales de manera escalada, y así, poder experimentar la sintonización de controladores mediante diferentes métodos, y corroborar la teoría enseñada. De esta manera se permite a los alumnos conocer los procesos que se realizan en la industria, y obtener conocimientos valiosos a la hora de entrar al mundo laboral y empresarial. Es por ello, que muchas universidades en el mundo, implementan diferentes procesos en plantas piloto, con el fin de obtener buenos profesionales (Buelna Quijada, 1995).

En muchas universidades del mundo se pueden encontrar estas plantas piloto. Por ejemplo en la universidad de Zaragoza, España, se encuentra una de las plantas piloto de ciencia y tecnología de los alimentos. En esta instalación se encuentra toda la infraestructura necesaria para el procesado y control de los alimentos en condiciones similares a las utilizadas en las industrias alimenticias. El objetivo de esta planta es poner la investigación en servicio de las diferentes empresas alimentarias del mundo, haciendo estudio y optimización de los diferentes procesos en esa industria (Facultad de Veterinaria - Universidad de Zaragoza, 2004).

Las plantas piloto se usan también para la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Por ejemplo, la Universidad Nacional del Litoral construyó, en compañía de varias empresas del sector de tratamiento de residuos, una planta piloto para generar energía a partir de los residuos orgánicos no peligrosos con el fin de hacer un aprovechamiento máximo de todos los residuos para recuperar eficientemente toda la energía posible. Esta planta

permitirá realizar estudios e investigaciones para determinar la viabilidad de este proceso para ser implementado en mayor escala (Universidad Nacional del Litoral, 2015).

En la universidad Pontificia Bolivariana (UPB) se encuentra una variedad de plantas piloto que permiten a los estudiantes de diferentes carreras de la ingeniería, practicar en la sintonización de controladores PID, como también en la construcción de sus propios controladores, ya sean por métodos de control avanzados o clásicos. Una de estas plantas Módulo de Sistema de Tanques en Serie, es la expuesta en el presente trabajo de grado y está ubicada en los laboratorios de Operaciones Unitarias de la universidad. En el siguiente capítulo “Estado inicial de la planta” se describe como se encontraba la planta antes de comenzar el presente trabajo de grado, y en los capítulos posteriores se describe el proceso realizado a la planta y el resultado final.

2. REPORTE DEL ESTADO INICIAL DE LA PLANTA

El Módulo de Sistema de Tanques en Serie inició su construcción, en una primera etapa, como un proyecto de docentes investigadores del grupo A+D de la UPB. Su objetivo era construir una planta a escala, la cual permitiera a estudiantes de pregrado y posgrado afianzar los conocimientos en instrumentación industrial y control de procesos permitiendo la implementación y prueba de algoritmos de control.

El diseño y construcción de la planta se planeó para ser realizado en tres etapas, todas lideradas por docentes pertenecientes al grupo A+D y en colaboración de estudiantes de pregrado y posgrado quienes incluyeron en sus trabajos de grado la asistencia en investigación, construcción y desarrollo de la planta.

Este proyecto (el presentado en este documento) comenzó en Junio del año 2014, luego que se finalizara la primera y parte de la segunda etapa correspondientes al diseño, construcción y montaje del sistema eléctrico y de control del proceso, y luego que esta fuera trasladada a los laboratorios de Operaciones Unitarias de la UPB. De esta manera este proyecto corresponde a la finalización de la segunda etapa con la realización de los planos y al avance de la tercera etapa en los siguientes aspectos:

- Calibración y puesta a punto de los elementos que componen el proceso.

- Desarrollo de la aplicación de comunicación entre el PC y el PLC.
- Desarrollo de la aplicación para implementar el sistema DAQ en la planta.
- Implementación de un control PID en LabVIEW®.

A continuación se presenta una breve descripción de las diferentes etapas del proyecto.

2.1. Primera etapa: Selección de componentes y diseño virtual

La primera etapa del proyecto, consistió en el diseño de la planta. Esta inició con el planteamiento de los requerimientos de diseño y funcionamiento, luego estableciendo los equipos de control a usar, seguido por los elementos que debían componer la instrumentación. Finalizó con el diseño virtual en herramientas de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en ingles *Computer-Aided Design*).

Requerimientos de diseño. Los requerimientos de diseño planteados por los docentes (Ingenieros químicos, electrónicos, mecánicos y de control) encargados del proyecto fueron los siguientes:

- Usar instrumentación industrial para la medida de las variables importantes en la planta (flujos, niveles, perturbación, entre otras).

- Permitir diferentes configuraciones y sistemas dinámicos.
 - Usar diferentes tecnologías de control.
 - Tener posibilidad de implementar diferentes estrategias de control.
 - Posibilidad de implementar acceso remoto a la planta.
 - Planta compacta y optimización de espacio.
- (Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo, 2014)

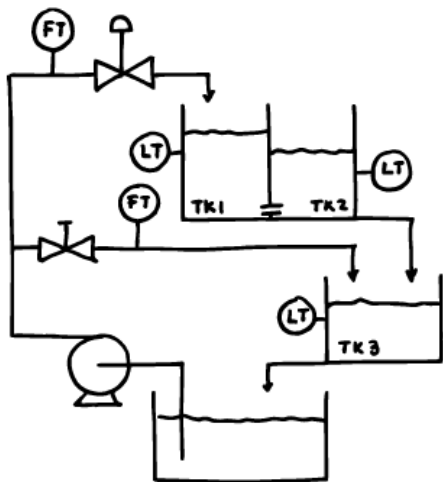


Figura 1. Diagrama conceptual de la planta. Reproducida con permiso de Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo (2014)

Elementos de Control. Dentro de los requerimientos planteados, está la posibilidad de realizar control con diferentes tecnologías, por lo que fueron seleccionados tres equipos de control diferentes, y de uso industrial, estos son: (Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo, 2014)

- Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés *Programmable Logic Controller*): El PLC seleccionado para la planta fue un Siemens SIMATIC S7-1200.
- Controlador Industrial: El elemento de control industrial seleccionado fue el Foxboro 762CNA.
- Control computarizado: Se selecciona un computador con el software LabVIEW®.

Para ver mayores especificaciones de estos elementos, se recomienda remitirse al documento Anexo 1 - Asistencia en Investigación y Desarrollo en Módulo de Sistema de Tanques en Serie correspondiente al Anteproyecto de este proyecto.

Instrumentación y actuadores. Toda la instrumentación y los elementos de control final seleccionados para la planta son de uso industrial. Estos elementos son descritos en la Tabla 1.

Componentes mecánicos. En los componentes mecánicos se definieron parámetros importantes de la planta como lo son el tamaño de los tanques y el material de construcción de los mismos, la estructura mecánica de sujeción de todos los elementos y la

forma de las compuertas de salida del flujo de agua entre los tanques.

Tabla 1. Instrumentación seleccionada para la planta

Elemento	Rango	Fabricante	Modelo
Bomba	0-6 m ³ /h	Pedrollo	CP620D
Válvula de control		Spirax – Sarco	LEA31
Actuador Neumático	20 mm	Spirax – Sarco	PN9120E
Posicionador	4-20 mA	Spirax – Sarco	SP5000
Transmisores de nivel	4-20 mA	Siemens	SITRANS P DS III
Transmisores de flujo	4-20 mA	Siemens	SITRANS MAG5100W
Compresor de aire	7 cfm	KTC	MAG5100W 431-2525

Componentes eléctricos. Aparte de los elementos de control, actuación e instrumentación, se hace selección de los elementos que componen el sistema de potencia y alimentación de la instrumentación de la planta.

El resultado final del diseño luego de realizar la selección de los componentes que componen la planta y la estructura de esta, es mostrado en la Figura 2.



Figura 2. Diseño final en herramienta CAD. Reproducta con permiso de Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo (2014)

2.2. Segunda etapa: Construcción de la planta

Luego de finalizar la etapa de diseño, el grupo A+D presentó el proyecto al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación - CIDI - con el fin de obtener financiación para la construcción de esta planta en los laboratorios de la UPB. El CIDI aprobó el proyecto y en el año 2013 comenzó la construcción física de la planta.

Para la construcción de esta planta fue necesario la colaboración de estudiantes de Ingeniería mecánica, quienes en su proyecto de grado trabajaron en la construcción, ensamble y ajuste de todos los componentes mecánicos de la planta como lo son los tanques, la estructura, las compuertas de los tanques, entre otros elementos.

Para el montaje del sistema eléctrico prediseñado, fue necesaria la colaboración de un estudiante de maestría quien en su trabajo de grado debía presentar un control realizado en esta planta. Este estudiante se encargó de realizar todo el montaje eléctrico de los sistemas de potencia, protección, control y del montaje de todo el ramal eléctrico.

Cuando inició el presente proyecto, la planta ya estaba construida y finalizada en su parte mecánica y la parte eléctrica y de control tenía toda la instrumentación instalada. Pero para terminar esta etapa era aún necesario la realización de los planos eléctricos, de control, potencia y distribución de elementos para permitir un próximo mantenimiento o ajuste de la planta.

Es importante resaltar que algunos elementos de la instrumentación no habían sido instalados en el momento de la realización del presente proyecto, como lo son el transmisor de nivel del tanque 1, el transmisor de flujo de perturbación, el transmisor de caída de presión en el Elemento Final de Control (EFC) y la interfaz HMI (Del inglés *Human Machine interface*), las cuales no fueron adquiridas con el presupuesto del CIDI. Para tener mayor claridad de la instrumentación presente en la realización del proyecto, en la Tabla 2 se presenta el listado de instrumentación planeado en el diseño y cuales están instaladas.

Obtención de planos. Debido a que el ingeniero que realizó el montaje de la planta no hizo los planos, se hace necesario dentro de los objetivos del proyecto obtener, digitalizar y entregar todos los planos de control y potencia correspondientes. Para la obtención de los planos se hace necesario el uso de instrumentos electrónicos que permitieron obtener la continuidad de cada cable con el fin de detectar su inicio y su fin. Los planos se realizaron en el Software Visio Profesional del paquete de Office y se pueden observar en el Anexo 2.

Tabla 2. Instrumentación de la planta

Variable	Instrumento	Instalado
Nivel tanque 1	Siemens Sitrans P DS III	No
Nivel tanque 2	Siemens Sitrans P DS III	Si
Nivel tanque 3	Siemens Sitrans P DS III	Si
Flujo de entrada tanque 1-2	Transmisor: Siemens F M MAG6000 Sensor: Siemens Sitrans MAG 5100W	Si
Flujo de perturbación (tanque 3)	Transmisor: Siemens F M MAG6000 Sensor: Siemens Sitrans MAG 5100W	No
Caída presión EFC	Siemens Sitrans P DS III	No
Posicionador electro neumático de la valvula	Spirax Sarco SP500	Si
Variador de frecuencia de la Motobomba	Yaskawa J1000	Si
Foxboro PLC	Foxboro 762CNA	Si
Valvula	Siemens S7-1200	Si
Pantalla HMI	Spirax Sarco LEA31	Si
	Siemens	No

Los planos a realizar son los siguientes:

- Diagrama de Bloques General.
- Diagrama Unifilar.
- Diagrama Elemental de Potencia.
- Diagrama Elemental del Circuito de Control.
- Diagrama de Interconexión.
- Diagrama de Conexión.
- Diagrama del Panel de Conexiones.

Los planos obtenidos fueron enviados para revisión al profesor Hernán Valencia de la facultad de Ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, quien recomendó realizar las modificaciones que se mencionaran, para que la instalación eléctrica actual cumpla con la normatividad internacional ANSI e IEC, que rigen el diseño de los circuitos. En el Anexo 3 – Correcciones a los planos eléctricos y de control de la planta, se listan las correcciones y se agrega la firma del profesor Hernán Valencia y de la directora del trabajo de grado Norha Posada, quienes se muestran de acuerdo con las correcciones planteadas y el levantamiento de planos realizado en este proyecto. Las modificaciones que deben realizarse son:

- No usar un contactor como sistema general de protección. El contactor es un elemento de control y se recomienda usar uno de manera individual para cada motor de la planta.

- Todo relé térmico de protección (OL) debe ir justo antes del motor.
- El relé térmico de protección (OL) se usa para protección de motores. Para la protección de los componentes electrónicos debe usarse un mini *breaker*.
- Cuando el circuito de control se alimenta a 220 VAC, cada línea debe estar protegida por un fusible.
- El Neutro (N) nunca debe ser interrumpido por ningún elemento. Cuando se tiene una protección trifásica para un circuito monofásico, la línea del circuito debe pasar por los 3 contactos del elemento, sin dejar ningún contacto sin conexión y no se interrumpe el neutro.

Con la obtención y digitalización de los planos se terminó la segunda etapa, lo que permitió dar paso a la tercera y última etapa para la finalización de la planta.

2.3. Tercera etapa: Ajuste, calibración y puesta a punto de la planta

La tercera etapa, la cual será desarrollada en gran parte dentro de este proyecto, corresponde a la calibración y puesta a punto de la instrumentación instalada (ver Tabla 2), al desarrollo de las aplicaciones de comunicación y adquisición de datos y a la implementación de un controlador PID en LabVIEW®. Esta etapa comenzó cuando la instrumentación fue instalada, la cual debía ser ajustada y calibrada, para hacer la correcta lectura de estos

elementos, con el fin de permitir a estudiantes y profesores realizar las actividades de docencia, investigación y desarrollo en el módulo. Los procedimientos correspondientes a esta etapa son descritos en los Capítulos 3, 4, 5 y 6 del presente documento.

3. AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE CONTROL

Cuando la segunda etapa del proyecto finalizó (descrita en el Capítulo anterior), el procedimiento a seguir consistió en realizar el ajuste y calibración de la instrumentación instalada con el objetivo de adecuarlos en los rangos de trabajo seleccionados. Cada calibración fue realizada con el manual de usuario dado por el fabricante del instrumento, para poder comprender claramente cada parámetro de configuración y así realizar el ajuste adecuado.

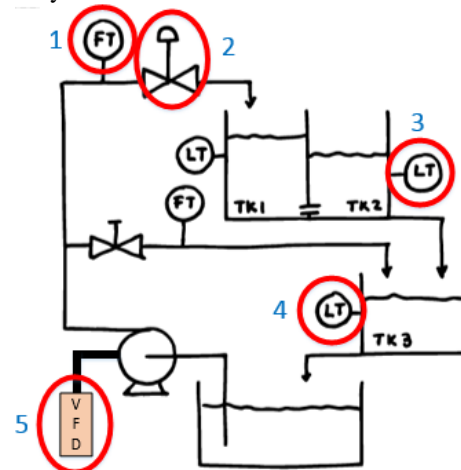
Los instrumentos calibrados y ajustados en este proceso se muestran en la Figura 3. Estos instrumentos corresponden a todos los instalados en el momento de realización de la calibración. La demás instrumentación hizo parte del diseño inicial y su instalación, calibración y ajuste están programados para una etapa posterior del proyecto.

3.1. Calibración de los transmisores de nivel

Los transmisores de nivel usados son los Siemens Sitrans P DS III. Estos elementos son los encargados de realizar la medición del nivel de líquido en el tanque 1-2 y en el tanque 3, y transmitir la señal en un rango de corriente industrial 4-20 mA al sistema DAQ.

Este equipo se basa en un principio de funcionamiento por presión diferencial para determinar la altura del tanque, por lo que este elemento debe ir conectado mediante un conducto a la parte inferior

del tanque para así medir la presión que ejerce el líquido sobre el fondo de este y determinar la altura.



1. Transmisor de flujo de entrada.
2. Posicionador electro-neumático de la válvula.
3. Transmisor de nivel tanque 2.
4. Transmisor de nivel tanque 3.
5. Variador de frecuencia de la motobomba.

Figura 3. Instrumentación instalada en el módulo. Reproducida y modificada con permiso de Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo (2014)

El proceso detallado de calibración de este componente se puede observar en el Anexo 4, correspondiente al “Manual de calibración del transmisor de nivel Siemens Sitrans P DS III”. En el momento de realizar la calibración y ajuste, en la planta se encontraban dos transmisores de este tipo, uno instalado para el tanque 2 y otro instalado para el tanque 3. Estos dos transmisores son calibrados bajo los parámetros definidos a continuación.

Unidad física de medida. El transmisor está planteado como elemento de medición del nivel de cada tanque por lo que se selecciona la unidad de medida de longitud “cm”.

Límite inferior y superior del nivel del líquido en el tanque. Para determinar el límite inferior y superior del nivel, se hace necesario definir un rango de trabajo para el control (ver Figura 4). Estos rangos de trabajo son definidos de manera idéntica para ambos tanques.

- Límite inferior (h_{min}): Para determinar el valor del límite inferior se realizó un llenado del tanque hasta que el líquido comenzó a salir por la compuerta, luego se detuvo la motobomba y se esperó que el nivel del tanque se estabilizara. El nivel en que quedó el agua fue de 3 cm, valor seleccionado como el límite inferior y correspondiente a una corriente de salida de 4 mA.
- Límite Superior (h_{max}): El límite superior de los tanques fue determinado a partir de las dimensiones de estos, los cuales

tienen una altura máxima de 19 cm. El límite superior del tanque y correspondiente a la señal de 20 mA es 17 cm para ambos tanques, así dejando un volumen considerable para generación de alertas de nivel máximo superado.

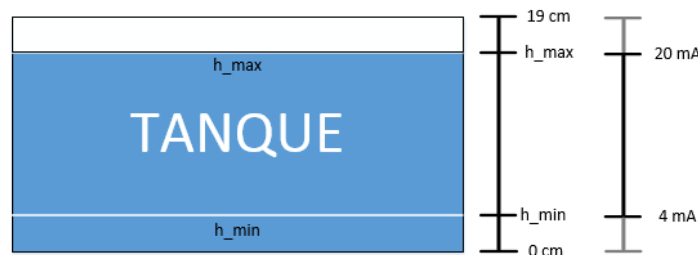


Figura 4. Niveles mínimo y máximo configurados en los tanques

3.2. Calibración del transmisor de flujo

El transmisor de flujo instalado en la planta es un Siemens F M MAG6000 acompañado del sensor Siemens Sitrans MAG 5100W. El transmisor de flujo es el equipo encargado de realizar la lectura del sensor de flujo y de transmitir al DAQ la señal de salida, ya sea digital o analógica, calibrada y ajustada dentro de un rango definido por el usuario y que depende del proceso que se está controlando.

El proceso de ajuste de este elemento se detalla en el Anexo 5 correspondiente al “Manual de Configuración del Transmisor de Flujo Siemens F M MAG6000”, en el que se explica cada parámetro configurado y el instructivo de configuración.

Los parámetros configurados son los mencionados a continuación:

Configuración de la clave de acceso. Este transmisor es un equipo usado a nivel industrial, y por eso permite configurar una clave de acceso al menú de configuración para que cualquier operario no pueda modificar los parámetros de este. En el módulo se decidió configurar una clave de acceso para evitar que estudiantes o personas no autorizadas modifiquen los parámetros de configuración del dispositivo. La clave de acceso que se configuró fue 1000.

Frecuencia de alimentación. El transmisor Siemens tiene la opción de alimentación por corriente alterna o directa. Cuando este dispositivo es alimentado con corriente alterna se hace necesario configurar la frecuencia de la onda de voltaje. Este valor varía para cada país entre valores de 50 y 60 Hz, siendo el último el valor correspondiente en Colombia.

Dirección de flujo. La dirección de flujo corresponde a la dirección del recorrido del líquido por el sensor. Para determinar si es un flujo positivo o negativo, el transmisor posee un indicador en forma de flecha indicando el sentido positivo del flujo (Ver Figura 5). En el caso del Módulo de Sistemas de Tanques en Serie, la motobomba

impulsa el líquido en sentido positivo, por lo que este fue el sentido seleccionado en la configuración.

Flujo máximo (Q_{max}). El sensor de flujo de Siemens mencionado está diseñado para medir caudales de 0 a 600 L/min (Siemens, s.f.). Por ello se hace necesario ajustar el transmisor para un caudal máximo determinado por la instrumentación instalada en la planta. Para el módulo, este caudal máximo está determinado por la potencia de la motobomba Pedrollo CP620D de 1 HP de potencia máxima, la cual está en capacidad de bombear como máximo un caudal de 100 L/min (Pedrollo, 2011), por lo que este valor es configurado como Q_{max} en la configuración del transmisor.

Unidad de medida del flujo (Totalizador). El transmisor permite al usuario seleccionar la unidad de medida del totalizador (valor de medida mostrado en el *display*) que se acomode con el proceso de la planta. La unidad seleccionada es de utilidad para hacer el ajuste del Q_{max} descrito en el numeral anterior.



Figura 5. Señal de indicación de la dirección de flujo del transmisor

Selección de la señal de salida. Este transmisor permite seleccionar el tipo de salida, ya sea analógica o digital de pulsos o de frecuencia variable. El módulo usa un controlador Siemens S7-1200 (con dos módulos de lecturas analógicas), como sistema DAQ, por lo que las señales manejadas deben ser señales analógicas. La señal analógica de salida que puede obtenerse de este dispositivo debe contar con la siguiente configuración:

- Unidireccional: El sensor de flujo solo medirá en la dirección del flujo positivo, por lo que la señal analógica debe ser unidireccional.
- Señal 4-20 mA: El DAQ fue programado para recibir señales analógicas en el rango de 4-20 mA sin alarmas.

La señal analógica de rango 4-20 mA configurada queda de la siguiente forma:

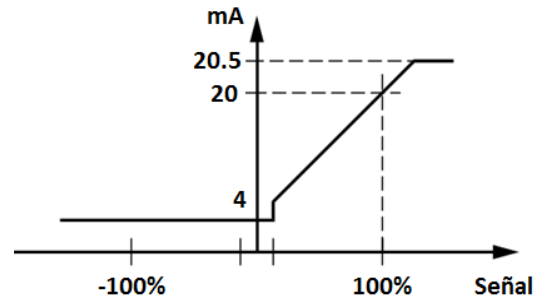


Figura 6. Forma de la señal 4-20 mA configurada

Características del sensor. El transmisor Siemens usado es un equipo que permite instalarse con una alta variedad de sensores Siemens. Es por esto que al transmisor se le deben configurar los parámetros correspondientes al sensor instalado, en este caso el Siemens Sitrans F M MAG 5100W. Estos sensores poseen normalmente un rotulo donde especifican las características a configurar (ver Figura 7).

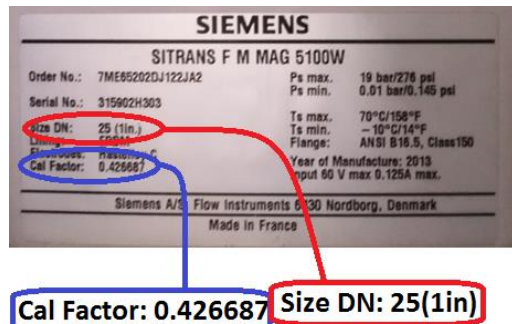


Figura 7. Rótulo del sensor Siemens instalado

Los parámetros que deben configurarse en las características del sensor son los siguientes:

- Sensor Prom – No instalada: El sensor de flujo posee instalada una memoria Sensor Prom. Esta memoria estaba mala en el proceso de calibración del equipo por lo que debió ser retirada, pero se encuentra en proceso de reposición por parte del fabricante. Por esta razón se selecciona la opción No instalada.
- Suprimir P40 – SENSORPROM: Si/No: Al no estar instalada la memoria Sensor Prom fue necesario seleccionar sí.
- Tamaño del sensor: Este valor puede ser tomado del manual de usuario del sensor o del rotulo y es mostrado como “*Size*

DN: tamaño”. Para el sensor instalado el valor es 25 (ver Figura 7).

- Factor de calibración: Este valor puede ser tomado del manual de usuario del sensor o del rotulo y es mostrado como “*Cal Factor*: valor”. Para el sensor instalado el factor de calibración corresponde a 0.426687 ver Figura 7.

Selección del lenguaje. Por defecto el transmisor viene configurado con la opción de lenguaje *English* (inglés). Debido a que será usado por personas de habla hispana será configurado en la opción de lenguaje *Español*.

3.3. Calibración del Posicionador electro-neumático de la válvula

En conjunto con la válvula y el actuador neumático instalados componen el EFC. El Posicionador instalado es un Spirax Sarco SP500, el cual es el encargado de convertir una señal analógica 4-20 mA en una señal de presión de aire para mover el vástago de la válvula.

Este equipo posee una opción de calibración automática que le permite autocalibrarse con los elementos instalados a la presión de aire manejada. Además, se debieron realizar ajustes y configuraciones de parámetros para que funcionara adecuadamente en el módulo. Para ver el proceso de calibración detallado de este elemento dirjase al Anexo 6 correspondiente al “Manual de

calibración del posicionador Spirax Sarco SP500”. A continuación se hace una breve descripción del proceso de calibración realizado y los parámetros ajustados.

Calibración automática. La función de calibración automática permite ajustar la carrera de la válvula luego de realizar la instalación de este. El proceso de calibración automática es necesario realizarlo para que el equipo permita ingresar a todas las opciones del menú de configuración. Para realizar este proceso es importante tener la fuente de aire comprimido del Posicionador dentro del rango de presión de funcionamiento que es de 20-84 PSI.

Calibración del Imán. La calibración del imán es un proceso importante para poner en funcionamiento el Posicionador, este proceso solo es necesario realizarlo la primera vez y se requiere de una correcta ubicación del imán frente al Posicionador, como se ve en la Figura 8, ya que esto permite que el equipo funcione dentro del rango real de apertura y cierre de la válvula.

Calibración de corriente. La calibración y ajuste de corriente del Posicionador permite corregir el error que se pueda presentar en la lectura de la señal. Se debe realizar para garantizar que la lectura realizada corresponda a la enviada por el equipo de control. Para realizar esta calibración es necesario generar una señal de corriente variable en el rango 4-20 mA, la cual, para la primera calibración se recomienda usar un generador de señal, En caso de requerir una recalibración de corriente, esta puede realizarse con los valores de corriente arrojados por el sistema DAQ (PLC Siemens S7-1200)

ajustándolos mediante la aplicación en LabVIEW® explicada en el Capítulo 5.

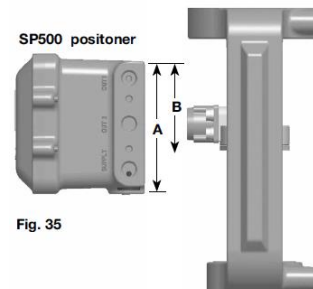


Figura 8. Ubicación del imán frente al Posicionador para un punto de carrera de la válvula (Spirax Sarco, s.f)

Recorrido de la válvula. Dependiendo de la aplicación de control, el funcionamiento de la planta, y la acción de falla que se desee de la válvula, se puede configurar el recorrido de esta. Las dos opciones posibles se muestran en la Figura 9. La seleccionada para la planta fue 0-100 %.

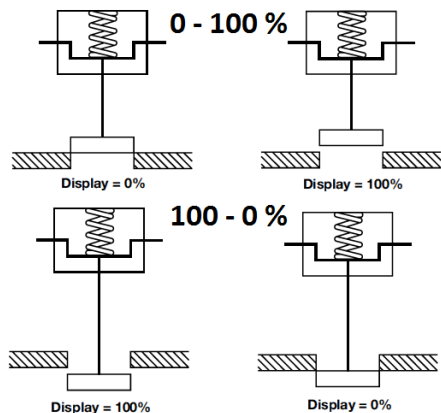


Figura 9. Tipos de configuraciones del recorrido de la válvula (Spirax Sarco, s.f)

Tipo de válvula. Este Posicionador permite configurar los siguientes parámetros los cuales definen el tipo de válvula que se está usando en la planta. Los parámetros que deben ser configurados en el módulo son los siguientes:

- VALVE: La planta tiene instalada una *2-Port* (2 puertos).
- ACT: Se configura en ON.
- CTRLA: Se selecciona *direct* (directa).
- MIN-T: Se configura en 0 %.
- MAX-T: Se configura en 95 %.

- DTRVL: Se configura en ON.
- MIN-R: Se configura en 4 mA.
- MAX-R: Se configura en 20 mA.

Característica de la válvula. Este parámetro hace referencia a la característica que se desee configurar en la válvula (Relación señal/carrera). Las características ofrecidas por el dispositivo son las mostradas en la Figura 10 y la seleccionada para ser configurada en el dispositivo es la curva lineal.

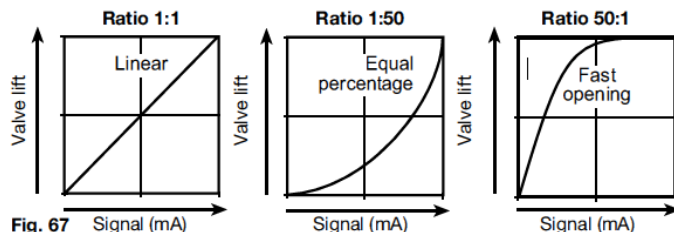


Figura 10. Características de la válvula (Spirax Sarco, s.f)

Los demás valores ajustables en el posicionador, por defecto corresponden a los valores de una válvula de dos puertos cerrada en falla con una carrera máxima del 95 %. Estos valores se adecuan a la válvula usada por lo que no son modificados.

3.4. Ajuste del Variador de frecuencia

El Variador de Frecuencia Digital (VFD) utilizado para el Módulo de Sistema de Tanques en Serie es un Yaskawa J1000. Este equipo tiene muchas funciones y aplicabilidades dentro de la planta pero para este proyecto, este equipo es configurado para seleccionar la frecuencia de entrada a la motobomba de manera manual y para encender y apagar el motor.

El VFD se encarga de hacer funcionar la Motobomba a diferentes Revoluciones Por Minuto (RPM) y es configurado de manera manual cada que la planta se enciende. Por esto, cada vez que se hace uso de la planta, es necesario presionar un botón en el dispositivo para encender la motobomba. Las instrucciones de manejo y configuración de este instrumento se encuentran en el Anexo 7 correspondiente al “Manual de uso básico del Variador de frecuencia Yaskawa J1000”

4. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PLC-PC

El Módulo de Sistema de Tanques en Serie, como se mencionó anteriormente, posee un PLC S7-1200 como sistema de adquisición de datos, al cual se le agregó un PC con el software LabVIEW® con el objetivo de implementar el sistema de almacenamiento en este dispositivo, es decir, de crear y guardar en un archivo de datos la información recopilada dentro del disco duro del PC. De esta manera el sistema de adquisición de datos está compuesto por el PLC, equipo encargado de recibir todas las señales de los sensores y la instrumentación (señales 4-20 mA) y enviarlas al PC para este almacenarlas en un archivo de datos que es para acceso del estudiante, docente o persona que esté usando la máquina (ver Figura 11). El uso del PC en el módulo puede omitirse y se puede realizar el control de la planta mediante el controlador Foxboro o un software diseñado específicamente para el PLC. Pero en el presente proyecto, se puede hacer el uso del PC como sistema de registro, monitoreo y sistema SCADA realizado en la aplicación LabVIEW®.

Como se plantea hacer uso de un PC en la planta, se debe establecer un protocolo de comunicación entre el PLC y el PC, el cual permita la transferencia de información de manera bidireccional y que a la vez, este protocolo sea posible implementarlo en ambos dispositivos, que sea robusto y permita una comunicación estable.

El protocolo de comunicación seleccionado para comunicar el PLC con el PC fue el *Transmission Control Protocol*, o TCP, debido a

que el PLC instalado en la planta posee el hardware necesario para implementar comunicación mediante este protocolo. Por el lado del PC, el protocolo TCP viene implementado en la mayoría de computadores ya que este protocolo es usado normalmente para establecer una red de trabajo y para permitir al PC conectarse a internet. El software LabVIEW® instalado en el PC, le permite a la aplicación acceder a este puerto del PC y obtener la información enviada por el PLC mediante este protocolo.

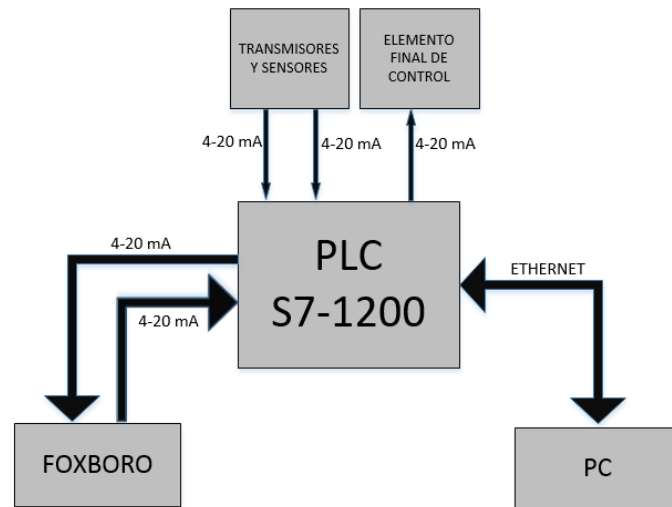


Figura 11. Diagrama de distribución en la planta

4.1. Protocolo TCP

El protocolo TCP es un conjunto de protocolos para comunicación de datos, el cual fue desarrollado inicialmente por ARPA (*Advanced Research Projects Agency*) para uso en el ejército estadounidense (ARPAnet), pero poco a poco se fue haciendo un protocolo abierto para centros de investigación, universidades y empresas. ARPAnet desapareció en 1990 y en los años siguientes, este protocolo fue haciéndose más fuerte, tanto que en la actualidad las redes troncales y los nodos de interconexión mediante este protocolo conectan todos los continentes (Darpa Internet Program, 1981).

Cada día, este protocolo adquiere más protagonismo y popularidad debido a que es un estándar abierto y ampliamente soportado, funciona con diferentes tipos de redes cableadas (Ethernet, ADSL o fibra óptica) y además porque emplea un direccionamiento único a cada equipo en la red sin importar la cantidad de equipos que estén conectados de manera simultánea (Darpa Internet Program, 1981).

Las principales características de este protocolo son:

- Permite el monitoreo de flujo de datos para evitar la saturación de la red.
- Permite formar paquetes de datos de longitud variada.
- Permite multiplexación de datos.

- Permite comenzar y finalizar la comunicación entre dispositivos de manera segura y con corrección de errores (Kioskea, 2014).

El protocolo TPC es usado principalmente para establecer conexión con internet y bases de datos, pero también se usa para crear redes locales para comunicación entre diferentes dispositivos conectados. Para establecer una conexión local entre dos o varios dispositivos se debe establecer una conexión Cliente-Servidor, donde el dispositivo emisor es el Cliente y el dispositivo receptor es el Servidor. El Servidor es el equipo encargado de establecer la dirección IP (*Internet Protocol*) y el puerto de la comunicación, por lo que el equipo Cliente debe enviar la información a la dirección y a puerto determinados por el Servidor, para permitir que este lo escuche y así establecer la conexión. La Figura 12 muestra un ejemplo de conexión por TCP mediante Ethernet entre un PC Servidor, y un PC y un PLC como Cliente.

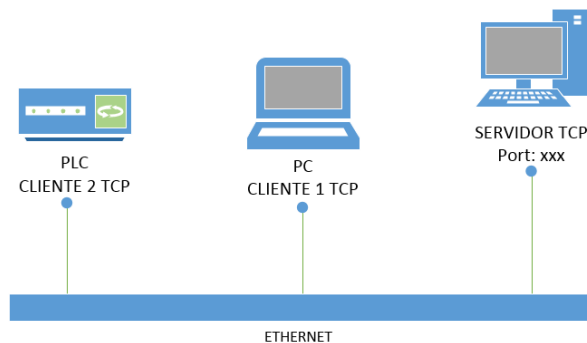


Figura 12. Conexión TCP entre diferentes equipos

Para establecer una conexión mediante el uso de este protocolo, y con dos aplicaciones (Servidor y Cliente) se deben cumplir los siguientes requisitos:

- El puerto TCP seleccionado debe ser un puerto abierto.
- La aplicación del Servidor es pasiva, por lo que solo está a la espera de una llamada de un Cliente, cuando lo escucha le responde.
- Se debe realizar una negociación denominada “negociación en tres pasos” entre ambas aplicaciones, para de esta manera establecer conexión y enviar información. Esta negociación se basa en un dialogo que realizan el Servidor y el Cliente para entrar en sincronización. La primera etapa o primer paso de la

negociación es que el Cliente transmita un segmento de información que contiene el indicador SYN en 1 con un número de secuencia inicial del Cliente. En la segunda etapa, el Servidor recibe el primer segmento del Cliente y le envía un acuse de recibido basado en un segmento con el indicador ACK en 1, el SYN en 1 y el número de secuencia del Servidor. Para terminar la sincronización, la tercera etapa el Cliente envía un acuse de recibido con el indicador ACK en 1 y el SYN en 0, además del número de secuencia inicial incrementado en 1. Cuando se culmina esta negociación en tres pasos, las dos máquinas están sincronizadas y puede comenzar la comunicación (ver Figura 13).

Se debe finalizar la comunicación (Kioskea, 2014).

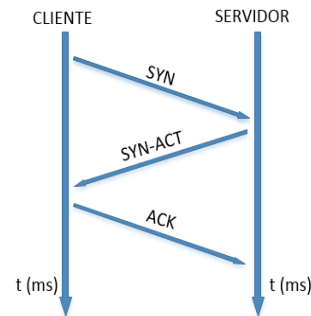


Figura 13. Negociación en tres pasos entre Cliente y Servidor TCP

4.2. Selección del Servidor y el Cliente

La comunicación entre el PLC y el PC fue realizada mediante protocolo TCP por lo que las aplicaciones realizadas en ellos deben cumplir, una el papel de Servidor y la otra el papel de Cliente, con el fin de realizar la comunicación como se explicó en el numeral anterior.

Para realizar las pruebas se debieron realizar dos aplicaciones, una para el PLC y otra para el PC. La aplicación para el PLC se realizó mediante la IDE (*Integrated Development Environment*) TIA Portal V12® soportada por Siemens para programar el PLC, en la cual se usa lenguaje LADDER para programarlo, y permitiendo configurar la comunicación Servidor y Cliente para comunicarse con la aplicación del PC. En el PC, la aplicación fue realizada en LabVIEW®, y también se hicieron programas de la aplicación como Servidor y Cliente.

El Servidor establece la dirección IP y el puerto de conexión, dejándolo abierto para que cualquier Cliente se conecte por ese puerto. En la planta se tuvo la posibilidad de implementar como Servidor al PC y al PLC, pero cuando se implementó el PLC como Servidor, los equipos no se estaban sincronizando por lo que no fue posible establecer la comunicación. Luego de realizar muchas pruebas alternando el papel de Servidor y Cliente entre ambos equipos, se seleccionó el PC como Servidor y el PLC como Cliente ya que así se logró establecer la sincronización y la comunicación entre ellos.

4.3. Implementación del Servidor

Como se mencionó, la aplicación del Servidor quedo en el PC y fue realizada en LabVIEW®. Esta aplicación, como Servidor, fue realizada para escuchar comunicaciones en el puerto 2000 y en la IP del computador en que se esté corriendo la aplicación, esta IP es inicialmente la 192.168.0.10. La selección de la dirección se seleccionó a partir del valor que tenía el PC donde se realizó la aplicación como valor por defecto de IP estática. El puerto se seleccionó el 2000 ya que los puertos del 1 – 1023 son de uso reservado.

LabVIEW® es un entorno de programación gráfica, el cual usa un lenguaje para programar llamado “lenguaje G”. En este lenguaje de programación no se escriben los programas, si no que se dibujan, lo que facilita al programador la realización de muchas aplicaciones. Además, presenta una ventaja muy importante ya que posee una gran cantidad de bloques prediseñados que facilitan el diseño de diferentes aplicaciones, como lo es la aplicación de la comunicación en la cual se usan varios de estos bloques prediseñados para la creación de la aplicación final de comunicación TCP como Servidor. Para entender la aplicación se presenta en la Figura 14 un diagrama en el que se detallan los bloques que se usan y el comportamiento secuencial de la aplicación de comunicación por TCP Servidor.

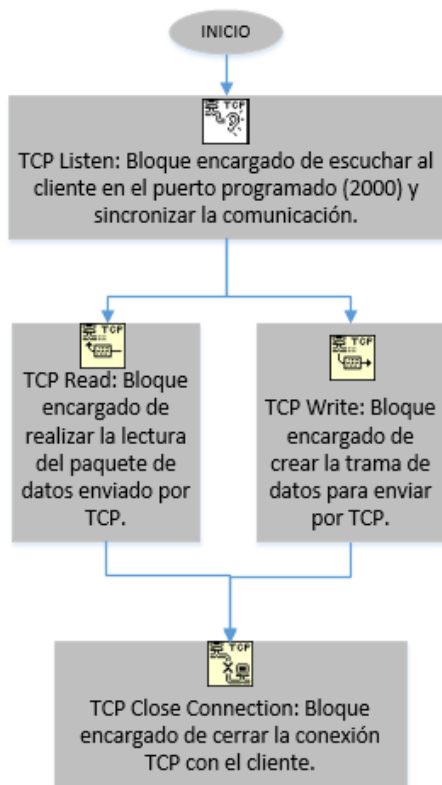


Figura 14. Diagrama de bloques de la aplicación Servidor en LabVIEW®

Cuando la aplicación es ejecutada, el bloque “TCP Listen” se queda escuchando en un puerto hasta que una aplicación Cliente establece comunicación con ella, el puerto seleccionado es el 2000 ya que es un puerto público. Cuando la comunicación es establecida, la aplicación entra a un ciclo *while* en el que ejecuta la lectura y la escritura de las variables de programa mediante los bloques “TCP Reader” y “TCP Writer”. Luego cuando la comunicación es detenida, u ocurre un error, se detiene la comunicación TCP mediante el bloque “TCP Close Connection”.

Para realizar la lectura de la trama enviada por el Cliente, es necesario extraer cadenas de 4 bytes equivalentes cada una a una señal medida por los instrumentos de medida y transmitida hacia el PLC. En la Tabla 3 se detalla los bytes pertenecientes a cada señal y el nombre que reciben en la aplicación del PC.

También se debe realizar el envío de algunas variables al PLC. Estas variables corresponden a la señal de control del EFC de 4 bytes y una señal de un byte, que se encarga de indicarle al PLC el origen de la señal de control (Foxboro o LabVIEW®). La Tabla 4 presenta en detalle información de las variables enviadas.

Tabla 3. Variables recibidas por el Servidor en la comunicación con el PLC.

Variable	Bytes [X-Y]	Nombre en LabVIEW®	Rango	Observación
Nivel Tanque 1	0-3	LT_1	0-27648	Sensor no instalado
Nivel Tanque 2	4-7	LT_2	0-27648	Hacia el PLC
Nivel Tanque 3	8-11	LT_3	0-27648	Hacia el PLC
Flujo de Entrada	12-15	FT_1	0-27648	Hacia el PLC
Flujo de Perturbación	16-19	FT_2	0-27648	Sensor no instalado
Caída de presión en la valvula	20-23	DEL_P	0-27648	Sensor no instalado
Salida 1 Foxboro	24-27	FX_AO1	0-27648	Hacia el PLC (EFC)
Salida 2 Foxboro	28-31	FC_AO2	0-27648	Hacia el PLC (no se usa)
EFC	32-35	EFC_DATL OG	0-100 %	Sale del PLC

Tabla 4. Variables enviadas por el Servidor al PLC.

Variable	Bytes [X-Y]	Nombre en LabVIEW®	Rango	Observación
Mando	0	Mando	0 - 256	Señal de un Byte
EFC	1-4	EFC	0-100 %	

4.4. Implementación del Cliente

El Cliente de la comunicación TCP establecida entre el PLC y PC es el PLC. Por tanto, la aplicación en este dispositivo fue diseñada para actuar como Cliente, enviando la información por una IP programada (192.168.0.10) y en el puerto establecido (2000). Esta aplicación fue desarrollada en el IDE TIA Portal V12® de Siemens, el cual usa un lenguaje de programación LADDER como se mencionó anteriormente. Este lenguaje permite hacer un programa dividido en segmentos, donde el orden de ejecución es generalmente de arriba a abajo y de izquierda a derecha, primero los contactos y luego las bobinas, de manera que al llegar a éstas ya se conoce el valor de los contactos y se activan si procede. Además permite el uso de diferentes bloques de programa prediseñados por el fabricante con el fin de facilitar el trabajo del programador a la hora de realizar tareas complejas, como por ejemplo, una comunicación TCP. De esta manera, implementando dos bloques, uno para el envío de información por TCP, y otro para la recepción

de datos por TCP, se implementó el programa correspondiente al Cliente en el PLC.

La Figura 15 y la Figura 16 muestran los bloques usados para establecer la comunicación y como debieron ser configurados para poder realizar el correcto envío y recepción de la información con el Servidor en el PC.

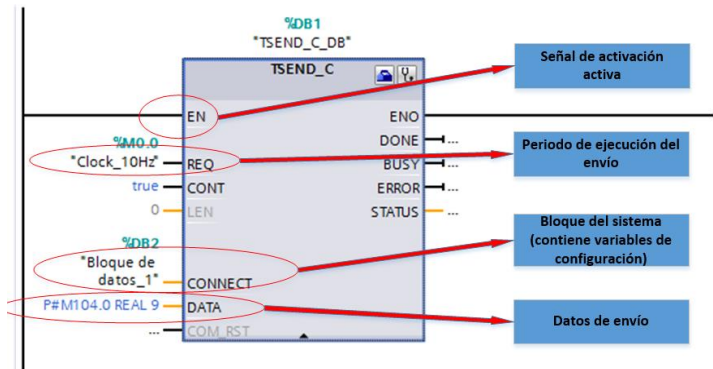


Figura 15. Bloque “TSEND” usado en la aplicación en TIA Portal V12®

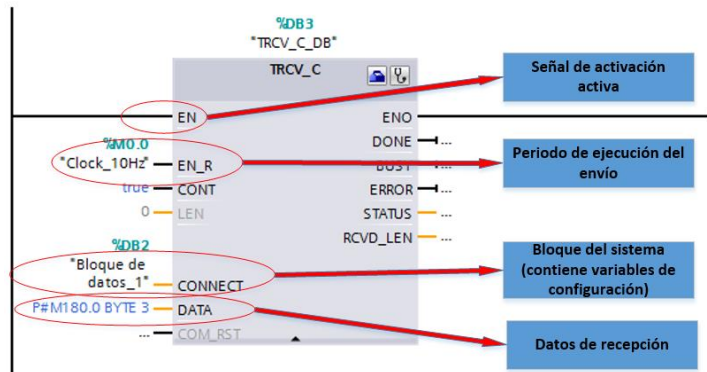


Figura 16. Bloque “TRCV” usado en la aplicación en TIA Portal V12®

4.5. Enlace Cliente-Servidor

Para realizar el enlace mediante protocolo TCP entre ambos dispositivos, el PLC y el PC, se utilizó conexión Ethernet, ya que ambos equipos poseen el hardware para usar este protocolo. La conexión Ethernet es usada comúnmente para transmisión de datos en redes de área local (*Local Area Network*) y puede lograr velocidades de transmisión de hasta 1 *Gigabyte* por segundo. Además, el costo de uso de esta tecnología es muy bajo, por lo que la convierte en la tecnología más usada para redes LAN.

La tecnología Ethernet esta acogida dentro del estándar de la IEEE 802.3, el cual define las normas que debe cumplir esta tecnología

para ser compatible con las diferentes tecnologías de protocolos de comunicación como lo son el TCP y el UDP (del inglés *User Datagram Protocol*). Existen diferentes variantes de la tecnología Ethernet, las cuales se diferencian según el tipo y el diámetro de los cables usados. En el Módulo de Sistema de Tanques en Serie se usó la variante denominada 100Base-TX (Ethernet Veloz) la cual usa un cable doble par trenzado (Categoría 5) y un conector RJ-45 (Figura 17), logrando velocidades de hasta 100 Mb/s. Además de este tipo de cable, existe la conexión por cable coaxial de diferentes diámetros, otras categorías de cable par trenzado y fibra óptica monomodo y multimodo.

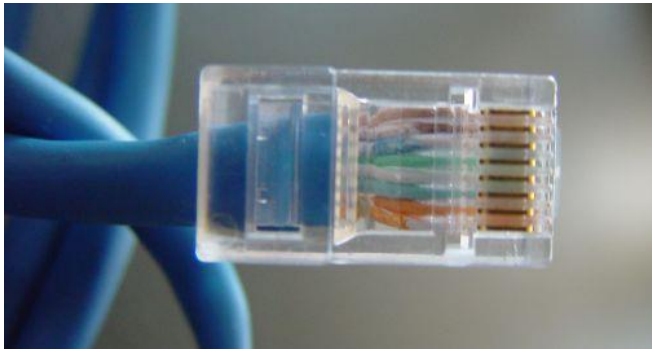


Figura 17. Conector RJ-45 usado para la comunicación TCP

5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema DAQ se encarga de la recopilación de información adquirida por medio de sensores que miden diferentes variables de un proceso, tales como voltaje, corriente, temperatura, presión, distancia, entre otros, como también de enviar a los actuadores la señal modificada en el bloque de control (National Instruments, s.f.). Es importante dentro de este proceso ya que permite visualizar, guardar y usar la información que se recopila para la ejecución del algoritmo de control programado en el software de LabVIEW® en el computador, además de permitir usar ésta información posteriormente para realizar cálculos y gráficos.

La adquisición de datos de todo proceso está dividida en etapas, donde se busca llevar el valor medido por el elemento de sensado hasta la interfaz para permitir la visualización, y a la base de datos que permite usar la información en el sistema de control y/o en el sistema de almacenamiento. Las etapas se pueden describir de la siguiente manera:

- Etapa de sensado: Los instrumentos encargados de esta etapa son los sensores, en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie se encuentran actualmente tres sensores de nivel y uno de flujo.
- Etapa electrónica de acondicionamiento de la señal: Cada sensor y actuador usado en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie posee una etapa de acondicionamiento. En los sensores, esta etapa es llamada transmisor, el cual convierte la señal analógica generada en el sensor en una señal 4-20 mA

entendible por el PLC. En el actuador del módulo, el EFC, usa el Posicionador para cumplir esta función.

- Etapa de cuantización de la señal: El instrumento usado en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie para realizar la digitalización de la señal es el PLC Siemens S7-1200, al cual se le añadieron dos módulos el módulo de entradas y salidas analógicas AI/AQ Siemens SM1234 para realizar lecturas de señales analógicas, estos módulos se denominan ADC los cuales poseen 14 bits de resolución y son configurados mediante la aplicación que se realizó en TIA Portal V12® con este fin.
- Etapa de comunicación: Como se mencionó en el capítulo anterior, el bus de comunicación usado para comunicar el PC y el PLC es Ethernet mediante protocolo de comunicación TCP.
- Etapa de control y almacenamiento: Para realizar el control y almacenamiento de las señales se realizó una aplicación en el PC con LabVIEW® que se encarga de realizar estas tareas de manera automática, generando archivos de texto (.txt) en una dirección específica del PC, establecida por defecto en la carpeta “data” en el disco C (C:\data) (Montero, 2005).

La Figura 18 muestra como se implementaron las diferentes etapas mencionadas en el Módulo de Sistemas de Tanques en Serie y el papel que cumple cada uno de los instrumentos, transmisores, y equipos de control instalados.

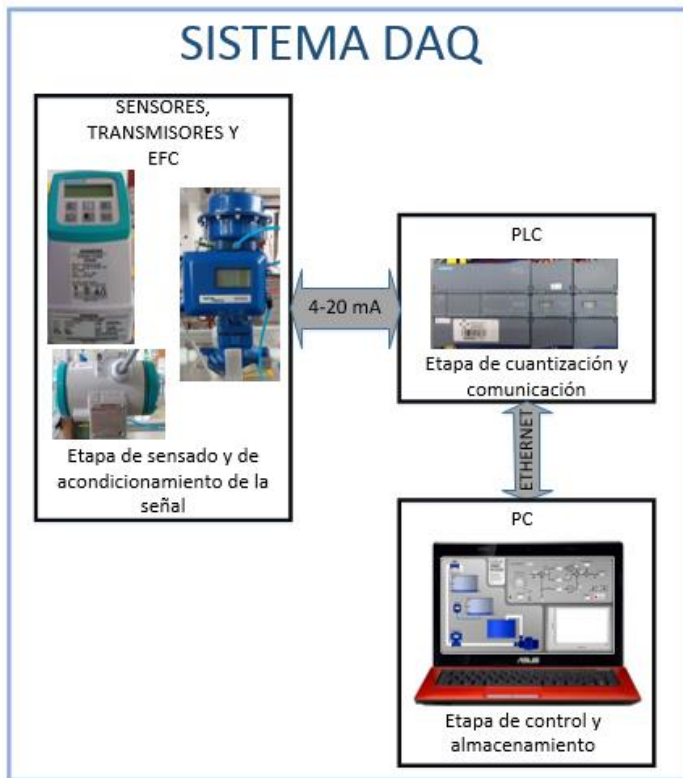


Figura 18. Implementación sistema DAQ en el Módulo de Sistemas de Tanques en Serie

El sistema DAQ implementado en el Módulo de Sistemas de Tanques en Serie, implicó la realización de dos aplicaciones, una en el PLC y otra en el PC. La función de estas aplicaciones se incluyó dentro de la aplicación de comunicación explicada en el capítulo anterior, ya que para completar un sistema DAQ también es necesaria la correcta comunicación entre el PLC y el PC para realizar el monitoreo, control y almacenamiento de las variables del sistema desde y en el PC.

5.1. Etapa de cuantización y comunicación con el PLC

El PLC es el elemento encargado de digitalizar las señales analógicas recibidas de los sensores-transmisores, y también de realizar la comunicación mediante protocolo TCP con el PC para que este realice las demás funciones del sistema DAQ (control y almacenamiento de las señales).

Para realizar la digitalización de una señal, o también denominada etapa de cuantización de la señal, se debieron definir inicialmente algunas variables de importancia las cuales son especificadas por el PLC y el módulo de entradas y salidas analógicas AI/AQ Siemens SM1234 que fue agregado al PLC. Estas variables son:

- Resolución de la señal analógica: La resolución es definida por el módulo ADC SM1234 el cual posee una resolución de 13 bits para las señales de entrada y 14 bits para la señal de salida.
- Rango de escala: Parámetro que define el rango de números enteros para realizar el escalamiento de la señal analógica en

la aplicación del PLC, este parámetro es definido por el PLC S7-1200 y va de -32768 a 32768 (equivalente a un escalamiento en 16 bits, con un bit de signo). A partir de este valor se define otro parámetro de programa correspondiente a cable cortado (valores analógicos entre 0 y 3.99 mA y 20 y 23.99 mA) equivalente a valores en el rango de escala entre 0-5529.6 y 27648-32768.

Mediante la IDE del PLC Siemens se realiza la aplicación de cuantización y comunicación, y como se dijo en el capítulo anterior, TIA Portal V12 posee bloques prediseñados dentro de los cuales están el “Scale_current_input” y “Scale_current_output”, los cuales realizan el proceso completo de escalamiento de la señal analógica. La Figura 19 muestra el bloque “Scale_current_input” usado para escalar la señal leída del transmisor de nivel del tanque 3 en valores entre 2764 (equivalente a cable roto) y 27648 (20 mA). Este proceso es realizado de la misma manera para todas las entradas analógicas generadas por los diferentes transmisores presentes en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie y cada una de las señales escaladas son almacenadas en la aplicación para luego ser enviadas mediante TCP al PC. La Figura 20 muestra el “Scale_current_output”, el cual convierte la señal digital entre 0 y 27648 a una señal analógica 4-20 mA la cual es enviada al EFC. Este bloque solo es usado una vez para generar la señal analógica que controla el EFC.

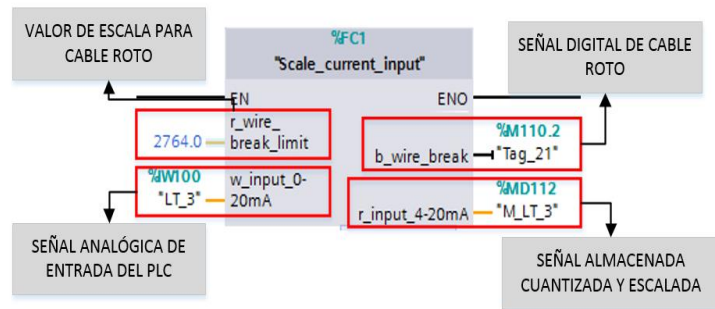


Figura 19. Bloque “Scale_current_input” usado para leer las entradas analógicas en el PLC

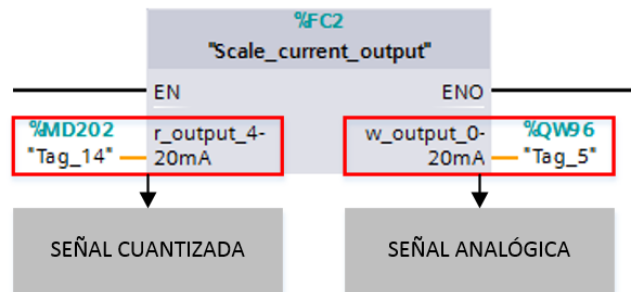


Figura 20. Bloque “Scale_current_output” usado para generar la señal 4-20 mA para controlar el EFC

En total se realizan 8 “*Scale_current_input*” y 1 “*Scale_current_output*” por lo que la aplicación debe almacenar un total de 9 variables. Estas variables poseen un nombre específico, una posición de memoria, un tamaño y nombre específico en la aplicación. En la Tabla 5 se detallan las características internas de cada variable.

Tabla 5. *Variables* y características programadas en la aplicación DAQ en el PLC

Señal	Tipo señal	Segmento de programa	Nombre interno	Dirección	Tipo de dato	Tamaño	Observación
Nivel tanque 1	Entrada	1	M_LT_1	MD104	Real	4 Bytes	Transmisor no instalado
Nivel tanque 2	Entrada	2	M_LT_2	MD108	Real	4 Bytes	
Nivel tanque 3	Entrada	3	M_LT_3	MD112	Real	4 Bytes	
Flujo entrada	Entrada	4	M_FT_1	MD116	Real	4 Bytes	Transmisor no instalado
Flujo perturbación	Entrada	5	M_FT_2	MD120	Real	4 Bytes	
Caida de presión en el EFC	Entrada	6	M_DEL_P	MD124	Real	4 Bytes	Transmisor no instalado
Salida 1 Foxboro	Entrada	7	M_FX_AO1	MD128	Real	4 Bytes	
Salida 2 Foxboro	Entrada	8	M_FX_AO2	MD132	Real	4 Bytes	
Salida al EFC	Salida	13	M_EM_C_output	MD202	Real	4 Bytes	

5.2. Etapa de control y almacenamiento – PC con LabVIEW®

Para completar el sistema DAQ se utiliza el PC para cumplir la etapa de control y almacenamiento de información mediante la aplicación realizada en LabVIEW®. En el capítulo anterior se explicó la etapa de comunicación realizada para permitir que el PC actuara como el Servidor de la comunicación TCP con el PLC, pero en este capítulo se hará énfasis en el almacenamiento de las señales recibidas en la comunicación TCP para de esta manera completar el sistema DAQ implementado.

Para realizar el almacenamiento de información en el PC mediante la aplicación en LabVIEW® fue necesario hacer uso de algunos bloques prediseñados por los diseñadores del programa y puestos en disposición para los usuarios. Estos bloques prediseñados son ejecutados dentro de otro subVI (*subVirtual Instrument*) secundario, el cual se ejecuta mediante un botón (Guardar), ubicado en el VI (*Virtual Instrument*) principal (Figura 23), el inicio y detención del almacenamiento de información. Dentro del subVI de almacenamiento se realizó una máquina de estados de 4 estados la cual permite ejecutar de manera ordenada el proceso para completar el almacenamiento de información en el PC. En la Tabla 6 se presenta un resumen de la máquina de estados donde se describen cada uno de los estados, y en la Figura 21 se muestra un diagrama de flujo de la máquina de estados implementada.

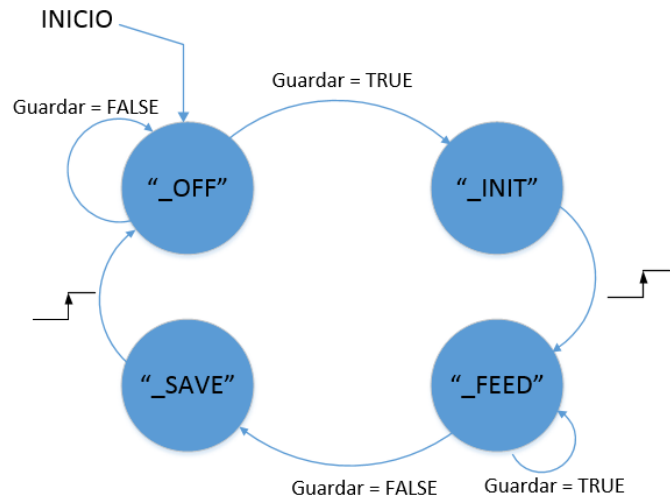


Figura 21. Diagrama de flujo de la máquina de estados para realizar el almacenamiento de datos

Tabla 6. Descripción de la máquina de estados del subVI de almacenamiento

Estado	Descripción	Transición	Próximo estado
“_OFF”	Primer estado de la máquina de estados, en este estado solo se espera a que el usuario ponga el selector en "guardar" y ahí comienza a correr la máquina de estados que genera los archivos de data log.	La transición depende del estado de la variable booleana “Guardar”: FALSE: El usuario no desea almacenar información. TRUE: El usuario desea guardar información.	Guardar = FALSE : Próximo estado “_OFF” Guardar = TRUE : Próximo estado “_INIT”
“_INIT”	Segundo estado de la máquina, asigna el tiempo inicial, crea la matriz de datos, y la matriz (<i>heads</i>) o cabecera la cual muestra el nombre y la unidad de medida de las variables del data log.	La transición al próximo estado es un ciclo de reloj de la aplicación.	“_FEED”
“_FEED”	Estado en el que se llena la matriz de los datos recibidos y del tiempo. Como tiene de entrada la matriz, entonces no sobrescribe los datos, si no que siempre escribe por debajo del último dato guardado.	La transición depende de la variable booleana “Guardar”: FALSE: No se desea continuar almacenando información. TRUE: Se desea continuar almacenando información.	Guardar = FALSE : Próximo estado “_SAVE” Guardar = TRUE : Próximo estado “_FEED”
“_SAVE”	Ultimo estado de la máquina de estados. En este se crean los archivos .txt que contienen los datos y la cabecera. Estos archivos se crean en la carpeta "data", ubicada en el disco C (C:\) del computador. Dentro de este estado se ejecutan dos tareas, la primera crea el archivo de datos y el archivo de cabeceras.	La transición al próximo estado es un ciclo de reloj de la aplicación.	“_OFF”

Como se mencionó anteriormente, el almacenamiento de información crea un archivo en la carpeta C:\data del PC que este corriendo la aplicación, pero esta ubicación puede ser modificada con el fin de facilitar al usuario el acceso a los archivos generados. Para modificar estos parámetros se debe abrir el VI correspondiente a las variables globales de la aplicación, en la cual se encuentran dos variables llamadas “DISCO” y “CARPETA” las cuales corresponden al disco del PC donde se encuentra la carpeta en la que se desea guardar la información.

Como también se mencionó en la Tabla 6, el programa crea dos archivos de texto, uno de ellos guarda la información del nombre y unidad de medida de las variables y recibe el nombre de “aaaamddd heads”. El otro archivo de texto que crea la aplicación corresponde a la matriz de datos guardados durante la prueba, el nombre de este archivo de texto es “aaaamddd_hhminminsegseg_data” en el cual se incluye la fecha y la hora de realización de la pruebas para que cada prueba reciba un nombre irrepetible. En la Figura 22 se muestran los archivos de texto almacenados en una de las pruebas realizadas y en la Tabla 7 se muestran los rangos de trabajo de las variables en los archivos almacenados.

La aplicación diseñada para ejecutar el almacenamiento de datos, se complementa con una interfaz gráfica tipo SCADA que permite al usuario establecer la conexión con el PLC, monitorear las diferentes variables de interés del Módulo de Sistema de Tanques en Serie, modificar el valor de la salida del EFC, guardar

información y abrir el controlador PID. En la Figura 23 se muestra la interfaz gráfica de la aplicación diseñada.

Tabla 7. Detalles de las variables almacenadas

Variable	Nombre	Unidad	Rango
Tiempo	t	ms	50-1000
Nivel Tanque 1-2	h1	%	0-100
Nivel Tanque 3	h2	%	0-100
Flujo de entrada	F_in	%	0-100
Set point	ref	%	0-100
Señal de control	EFC	%	0-100

ARCHIVO DE NOMBRES

20150128 heads: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

t (ms)	h1 (%)	h2 (%)	F_in (%)	ref (%)	EFC (%)
--------	--------	--------	----------	---------	---------

ARCHIVO DE DATOS

20150325_13_51_data: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

50,000	11,903	10,477	0,000	0,000	100,000
100,000	11,903	10,477	0,000	0,000	100,000
150,000	11,842	10,477	0,000	0,000	100,000
200,000	11,842	10,477	0,000	0,000	100,000
250,000	11,838	10,473	0,000	0,000	100,000
300,000	11,838	10,473	0,000	0,000	100,000
350,000	11,838	10,473	0,000	0,000	100,000
400,000	11,838	10,473	0,000	0,000	100,000
450,000	11,834	10,482	0,000	0,000	100,000
500,000	11,834	10,482	0,000	0,000	100,000
550,000	11,900	10,486	0,002	0,000	100,000

Figura 22. Forma de archivos de texto de almacenamiento

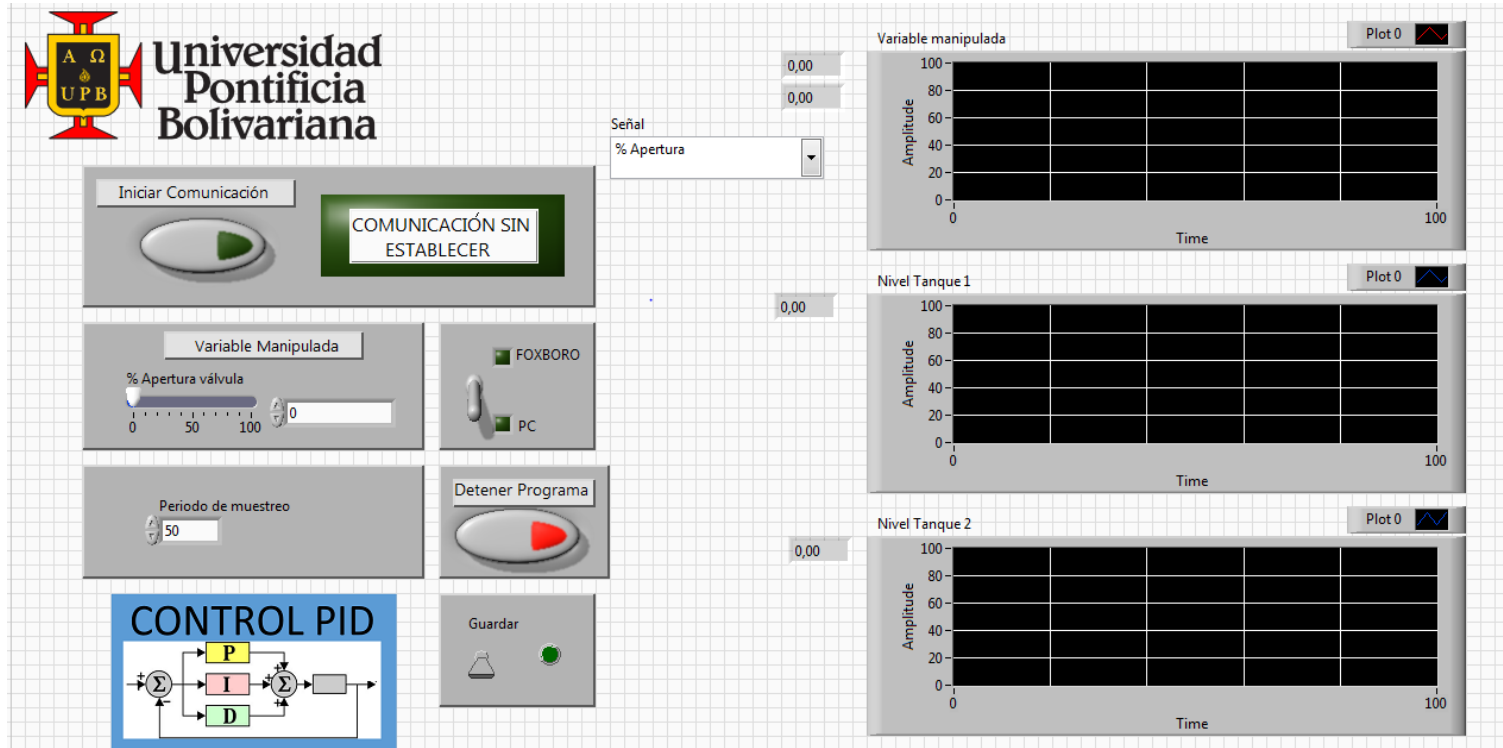


Figura 23. Interfaz gráfica de la aplicación de LabVIEW® diseñada

6. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADOR PID

Un controlador PID es un algoritmo de control que, mediante un elemento final de control (EFC) es capaz de mantener una variable (h3) en un valor deseado (Smith & Corripio, 1991). Los controladores PID son usados en el 95 % de las industrias ya que estos son fáciles de implementar. En el Módulo de Sistema de Tanques en Serie se realizó la sintonización del controlador PID mediante dos métodos diferentes y se observó el comportamiento de la respuesta en el tiempo y se comparó con las características de la respuesta en el transitorio especificadas (tiempo de respuesta, sobrepaso y error de estado estable).

Las características transitorias con la que serán comparadas las respuestas del sistema ante los diferentes controladores planteados son:

- Tiempo de estabilización $t_s < 50$ s,
- Sobrepaso $M_p < 10$ %,
- Error de estado estable $e_{ss} = 0$ %,
- Banda de error = 5 %.

Para la implementación del control PID, se requiere realizar un procedimiento que permite determinar el modelo de la planta, y de esta manera encontrar las constantes del controlador mediante diferentes métodos de sintonización del controlador. El procedimiento que se debe realizar es el siguiente:

- Definición de la configuración del proceso en el Módulo
- Obtención de la curva estática para definición de la zona lineal.
- Modelado de la planta.
- Selección de la estructura del controlador PID.
- Sintonización del controlador para la obtención de las constantes.
- Implementación y pruebas del controlador.

6.1. Definición de la configuración del proceso en el Módulo

Para comenzar el proceso de la implementación del control PID es necesario definir la configuración del proceso en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie, esto con el objetivo de fijar la planta en un solo comportamiento y determinar un modelo correspondiente a este. Estas configuraciones corresponden a la geometría del vertedero y a la frecuencia de alimentación de la motobomba.

Geometría del vertedero. El Módulo de Sistema de Tanques en Serie posee varias opciones para la geometría que define el vertedero de agua de un tanque al otro. La dinámica del sistema depende también del tipo de vertedero, por lo que la selección del vertedero es un factor importante para determinar el comportamiento de la planta. El módulo fue diseñado para permitir el intercambio entre cuatro vertederos diferentes, cada uno

definido por una ecuación diferente. Los vertederos diseñados son los mostrados en la Figura 24, de los cuales se seleccionó el vertedero lineal para ambos tanques por preferencia del autor.

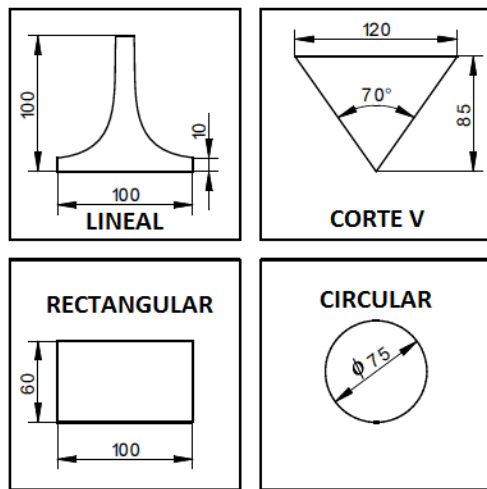


Figura 24. Vertederos diseñados para la planta.
(Vásquez, Posada, Castrillon, & Giraldo, 2014)

Frecuencia de alimentación de la motobomba. La motobomba es un elemento importante en el módulo ya que permite el flujo del agua hacia el tanque 1. Para esta implementación se configuró la motobomba en el valor nominal de diseño del motor que es 60 Hz.

6.2. Obtención de la curva estática y definición de la zona lineal

Obtener la curva estática de un proceso es importante, puesto que esta permite determinar la zona lineal de trabajo y un punto de operación. Para obtener la curva estática del módulo se deben definir los siguientes parámetros del sistema:

- Variable a controlar y variable a medir: Para este sistema, la variable a controlar es la misma que la variable a medir y es correspondiente al nivel del tanque 3 (h_3).
- Variable Manipulada: Flujo de agua de entrada a los tanques.

Luego de definir estos parámetros del sistema, se procede con la obtención de la curva estática, la cual se obtiene realizando variaciones en la variable manipulada y determinando el valor obtenido en la variable controlada. En el caso del Módulo de Sistema de Tanques en Serie, se realizan variaciones en la apertura de la válvula del 5 % en un rango del 0 % al 100 %. La curva estática obtenida se muestra en la Figura 25.

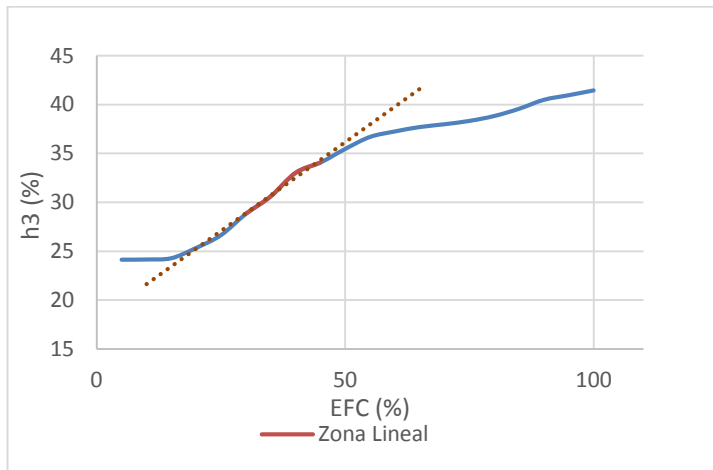


Figura 25. Curva estática de la planta

A partir de los datos obtenidos para la curva estática, se determina la Zona Lineal y el Punto de Polarización en los siguientes valores:

- Zona Lineal:
EFC: 30-45 %
Nivel: 29-34 %
- Punto de Polarización:
(EFC,Nivel) = (35 %,30.6 %)

6.3. Modelado de la planta

Para realizar el modelado de la planta se generan señales tipo escalón en el EFC que deben estar dentro de la zona lineal seleccionada en la curva estática, estos escalones tienen una amplitud de 7 % entre 33 % y 40 % en la apertura de la válvula. Estos escalones generan una excitación de la planta en la variable controlada (h_3), y la respuesta obtenida es la que debe ser analizada para modelar la planta. Para la determinación de este modelo, se llevan los datos obtenidos por el sistema DAQ al programa MATLAB®, el cual mediante el comando “Ident” permite analizar modelos con diferentes características (primer orden con o sin retardo, segundo orden con o sin retardo, entre otros), de los cuales, se debe determinar cuál de ellos describe mejor el comportamiento de la planta. La respuesta obtenida por la planta ante la aplicación de estos escalones de subida y de bajada es la mostrada en la Figura 26.

En la Figura 26 se evidencia que la respuesta del sistema es diferente en el escalón de subida y el escalón de bajada, teniendo un comportamiento diferente (sistema no lineal), por esta razón, se descarta la respuesta del sistema en los escalones de bajada y se toma el del paso de subida para la identificación del modelo mediante MATLAB®. La respuesta usada para obtener el modelo es mostrada en la Figura 27.

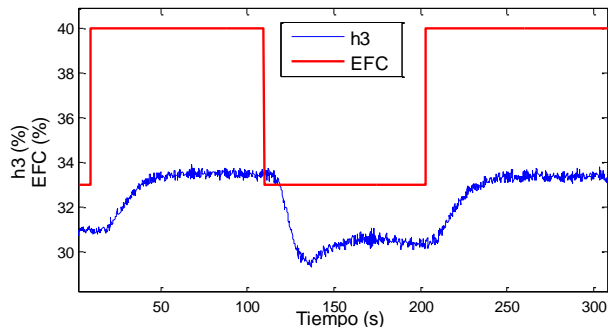


Figura 26. Respuesta del sistema ante escalones de subida y bajada

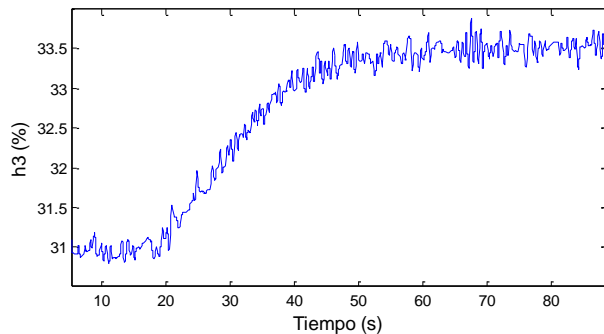


Figura 27. Respuesta del sistema ante un escalón de subida

Mediante el comando “ident” se determinó que el modelo que mejor describe la planta es un modelo de segundo orden sin retardo y con ambos polos reales. La ecuación del modelo esta descrita en la Ecuación 1.

$$H(s) = \frac{h3(s)}{EFC(s)} = \frac{0.84}{68.14s^2 + 16.57s + 1} \quad (1)$$

La respuesta de esta función de transferencia presenta una similitud del 85 % con la respuesta real de la planta. Este error de 15 % se debe a que la planta presenta ruido en la medición del nivel. En la Figura 28 se muestra la respuesta del sistema y del modelo ante un escalón de subida.

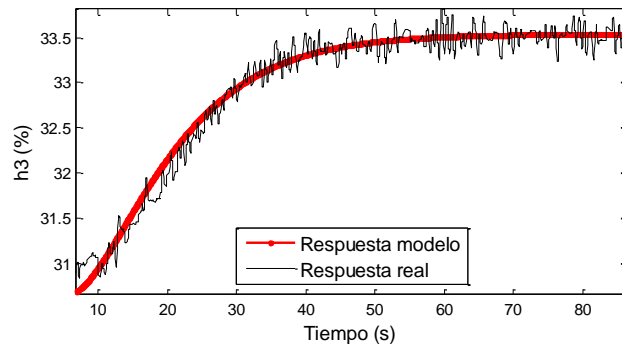


Figura 28. Respuesta del modelo y respuesta real ante un escalón

6.4. Selección de la estructura del controlador PID

Existen diferentes estructuras para describir un controlador PID, pero las tres más comunes son: ideal, paralela y serie.

Controlador PID ideal. El controlador PID ideal se caracteriza por que el error interactúa de manera independiente con las tres acciones de control. Se denomina ideal ya que la función de transferencia que lo describe mostrada en la Ecuación 2, es no causal (predictivo), por lo tanto no tiene una relación directa con la vida real ya que los sistemas no causales no son posibles implementarlos. El diagrama de bloques que describe este controlador se muestra en la Figura 29 (Universidad Nacional de Tucumán - FACET).

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (2)$$

Controlador PID paralelo. El controlador en paralelo, o no interactivo, es denominado así porque el error interactúa con las tres acciones de manera paralela. Son una versión modificada del controlador ideal, donde se busca eliminar la no causalidad del control agregando un polo a esta acción que no afecte la dinámica del sistema, con el fin de validar el uso de esta estructura en la vida real. La Ecuación 3 describe la función de transferencia de este modelo. El diagrama es el mismo al ideal (Figura 29) (Universidad Nacional de Tucumán - FACET).

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right). \quad (3)$$

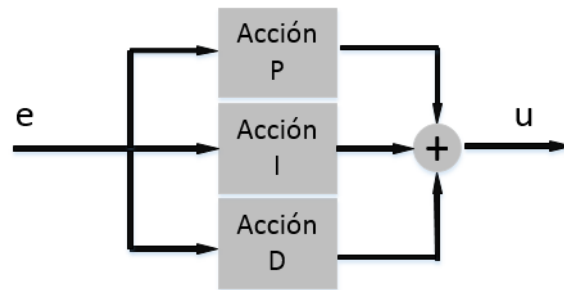


Figura 29. Diagrama de bloques de controlador PID ideal y paralelo

Controlador PID serie. El controlador PID serie, o interactivo, aplica la acción de control derivativa en primera instancia y luego de manera paralela aplica las acciones proporcional e integral. Esta estructura es la más común que usan los diferentes fabricantes de controladores. La función de transferencia que define este controlador se muestra en la Ecuación 4 y el diagrama de bloques que lo describe en la Figura 30 (Universidad Nacional de Tucumán - FACET).

$$G(s) = K_p \left(\frac{T_I s + 1}{T_I s} \right) \left(\frac{T_D s + 1}{\alpha T_D s + 1} \right). \quad (4)$$

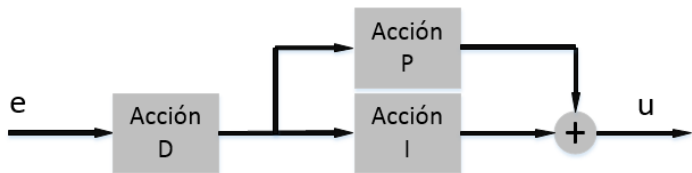


Figura 30. Diagrama de bloques de controlador PID serie

De las tres estructuras de controlador PID planteadas, se selecciona trabajar con la estructura PID paralela, ya que esta estructura se trabajó de manera paralela en la materia “Control Digital” de la UPB.

6.5. Sintonización del controlador para la obtención de las constantes

Luego de obtener el modelo se debe realizar la sintonización del controlador para de esta manera determinar las constantes de este. Se descarta el cálculo de las constantes para un controlador PID ya que la acción derivativa amplifica el ruido de la planta, lo que lo hace poco práctico para el Módulo de Sistema de Tanques en Serie, por tanto, se selecciona un control PI para controlar la planta.

Para realizar la sintonización del controlador, se usó el método de Ziegler Nichols (ZN) en lazo abierto o con la respuesta al escalón (ver Figura 31), el cual permite obtener las constantes del

controlador PI mediante la respuesta del sistema, en el cual se debe trazar una tangente en el punto de inflexión de la respuesta del modelo y a partir de esta tangente se determinan los parámetros α y L los cuales permiten obtener las constantes del controlador con las Ecuaciones 2,3 y 4.

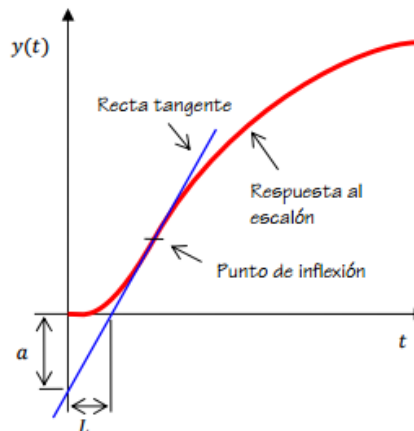


Figura 31. Método de ZN implementado

$$K_p = \frac{0.9}{\alpha}, \quad (5)$$

$$T_i = 3L, \quad (6)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}. \quad (7)$$

La obtención de los parámetros α y L se hizo mediante un *script* en MATLAB® el cual permitió realizar los cálculos de manera rápida y precisa. Los parámetros obtenidos son los siguientes:

$$\alpha = 0.105 \%, \quad L = 2.32 \text{ s.}$$

A partir de estos valores se determinan los valores de las constantes del controlador que será implementado en las pruebas. Estas constantes son:

$$K_p = 8.5 \text{ \%}^{-1}, \\ T_I = 6.963 \text{ s}, \quad K_I = 1.3 \text{ \%} \text{ s}^{-1}.$$

6.6. Pruebas del controlador

Para realizar las pruebas del controlador se desarrolló una aplicación en LabVIEW® la cual permite la implementación de un sistema en lazo cerrado en el Módulo de Sistema de Tanques en Serie. En esta aplicación se puede modificar el *set point* del sistema y las constantes del controlador para que el usuario pueda realizar las diferentes pruebas necesarias. En la Figura 32 se muestra la interfaz gráfica de esta aplicación desarrollada, la cual interactúa directamente con la aplicación de adquisición de datos para almacenar y controlar las variables del sistema.

Con las constantes obtenidas mediante la sintonización del controlador por el método de ZN se realizaron pruebas en la planta haciendo uso de la aplicación desarrollada. Para estas pruebas se aplicaron cambios en el *set point* tipo escalón de subida y de bajada, con una amplitud de 8 % entre 28 % y 36 %. Las respuestas obtenidas por el sistema se muestran en la Figura 33 y en la Figura 35, y la acción realizada por el EFC en el mismo rango de tiempo se muestra en la Figura 34 y en la Figura 36.

A partir de las respuestas obtenidas se realiza un análisis para determinar algunas características de la respuesta como lo son tiempo de estabilización (t_s), el error de estado estable (e_{ss}), el Sobrepasso máximo M_p y la banda de error.

Análisis de la respuesta del sistema al escalón de subida (Figura 33). A partir de la gráfica de la respuesta se determinan las siguientes características:

$$t_s = 47 \text{ s}, \\ e_{ss} = 1 \%, \\ M_p = 15.5 \%.$$

La respuesta obtenida presenta una oscilación en una banda de error del 10 %. Por tanto, aunque las otras características de la respuesta transitoria cumplen con las características esperadas, se concluye que este controlador no es adecuado para la planta ya que la banda de error es del doble de la esperada.

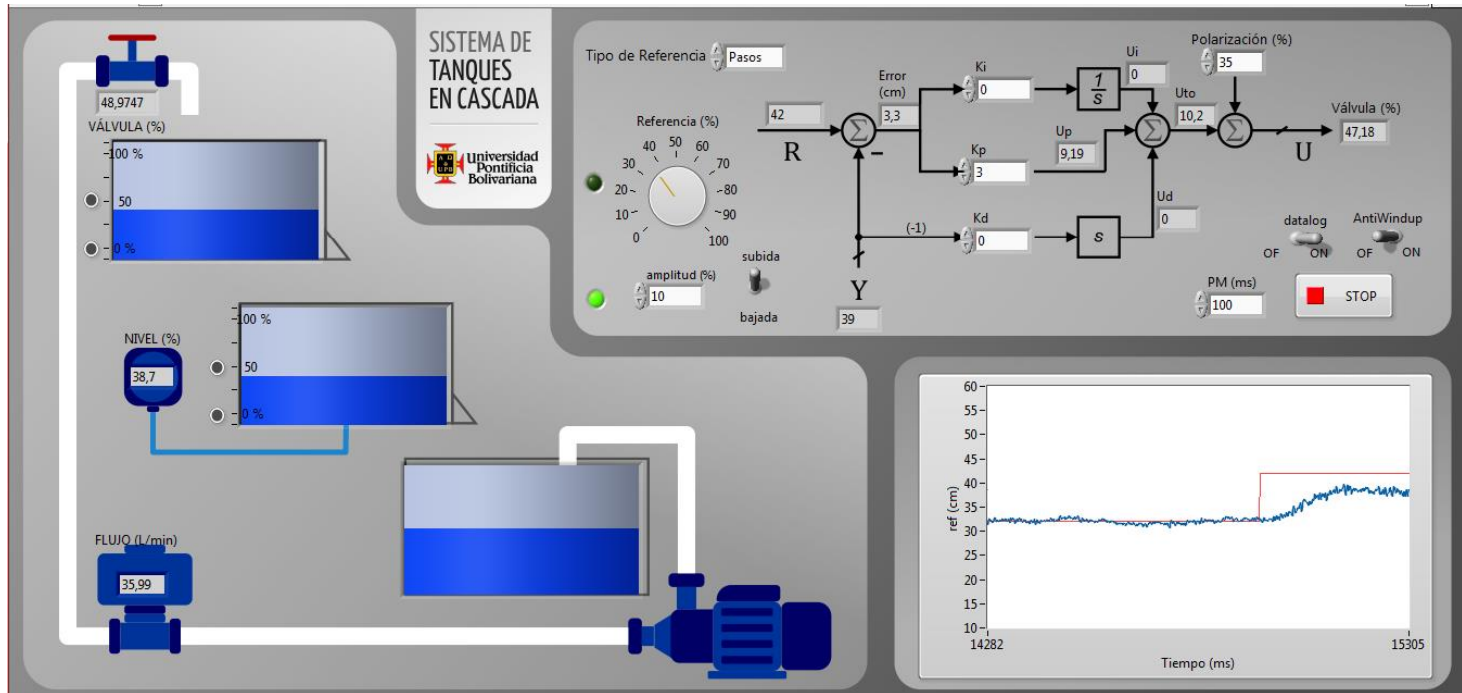


Figura 32. Interfaz gráfica de la aplicación para la implementación del control PID

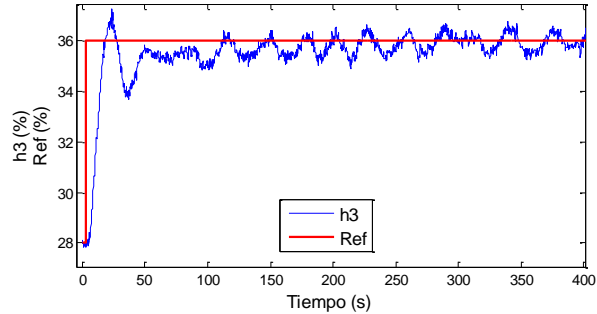


Figura 33. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de subida sintonizado por ZN

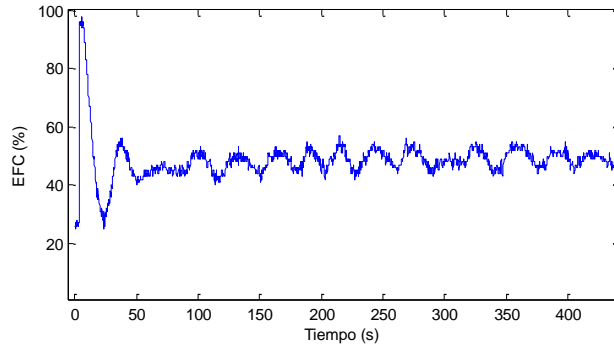


Figura 34. Respuesta del EFC ante un escalón de subida sintonizado por ZN

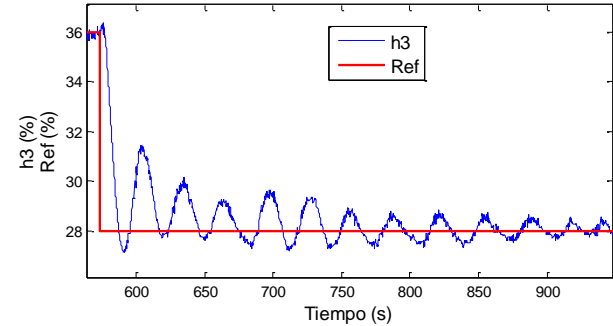


Figura 35. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de bajada sintonizado por ZN

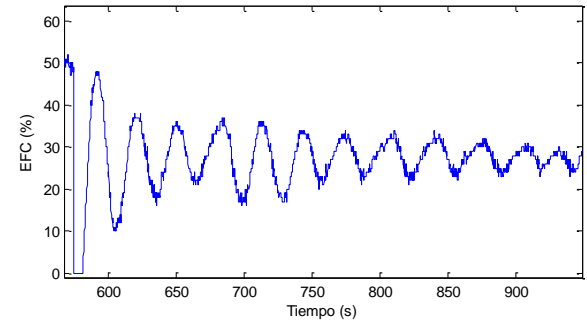


Figura 36. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de bajada sintonizado por ZN

Análisis de la respuesta del sistema al escalón de bajada (Figura 35). A partir de la gráfica de la respuesta se determinan las siguientes características:

$$\begin{aligned}t_s &= 47 \text{ s}, \\e_{ss} &= 1 \%, \\M_p &= 11 \%.\end{aligned}$$

De igual manera que la respuesta del controlador en el escalón de subida, en el escalón de bajada, también se presenta una banda de error del doble de la esperada. Por tanto, se concluye que las constantes obtenidas por el método de ZN no son adecuadas para controlar la planta puesto que se genera una oscilación en estado estable que no se desea. Esto ocurre debido a que el modelo del cual se obtuvo las constantes no representa fielmente el comportamiento de la planta ya que no presenta una similitud por lo menos mayor o igual al 95 %. Por tanto, para sintonizar el controlador para que se comporte con las características del transitorio esperadas, se propone el método de sintonización por tanteo, en el cual se usan las características reales de la planta y se determinan las constantes a partir del comportamiento real de esta.

6.7. Sintonización por método de tanteo

Debido a que mediante la sintonización por ZN no se controló el sistema como se deseaba, se procede a realizar la sintonización por el método de tanteo, el cual permite determinar el valor de las

constantes del controlador PI realizando un proceso manual de variación de las constantes hasta que se llega a la respuesta deseada.

Para realizar la sintonización de controlador por tanteo se realiza el siguiente procesamiento: Se puso la ganancia integral en cero ($K_I = 0$) y se comenzó con una ganancia proporcional en uno ($K_P = 1$), luego se comenzó a aumentar gradualmente el valor de la ganancia proporcional y se realizaron cambios tipo escalón en el *set point* de amplitud 8 % (entre 28 % y 36 %) para observar el comportamiento de la respuesta hasta que ésta se estabilizó. Después la ganancia proporcional se aumentó hasta obtener la respuesta deseada. Cuando se obtuvo esta constante, se procedió a modificar el valor de la constante integral, pero antes de hacer esto, se debe tener en cuenta que la acción integral empeora la respuesta en el estado transitorio, por lo que se debió disminuir un poco la constante proporcional encontrada anteriormente. Para terminar se procedió a variar la constante integral hasta que se obtuvo la respuesta deseada (Creus, 2010). Al finalizar este procedimiento se determinaron las siguientes constantes del controlador PI:

$$\begin{aligned}K_P &= 3 \%\text{s}^{-1}, \\K_I &= 1.8 \%\text{s}^{-1}.\end{aligned}$$

En la Figura 37 y en la Figura 39 se muestran la respuesta del nivel del tanque 3 (h3) del sistema controlado con las constantes mencionadas. La Figura 38 y la Figura 40 muestran el comportamiento del EFC en el sistema controlado.

La respuesta mostrada en la Figura 37, tiene el comportamiento deseado pues cumple con todos los parámetros establecidos para la respuesta deseada, obteniendo los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} t_s &= 28 \text{ s}, \\ e_{ss} &= 0 \%, \\ M_p &= 0 \%. \end{aligned}$$

Este valor de tiempo de estabilización fue obtenido en una banda de error del 5 %. Además, esta respuesta posee un error de estado estable de 0 % aproximadamente y un sobrepaso de 0 %.

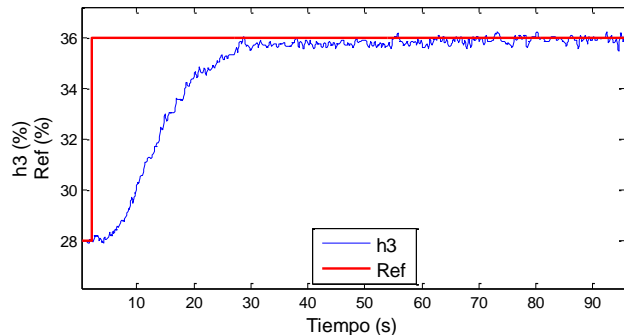


Figura 37. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de subida sintonizado por tanteo

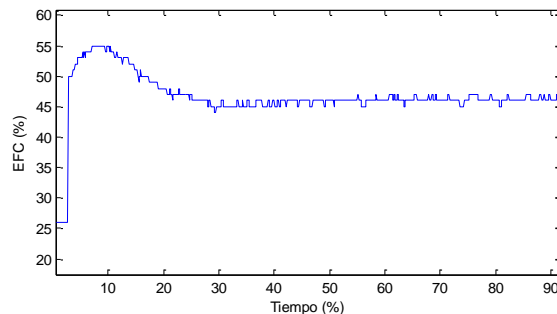


Figura 38. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de subida sintonizado por tanteo

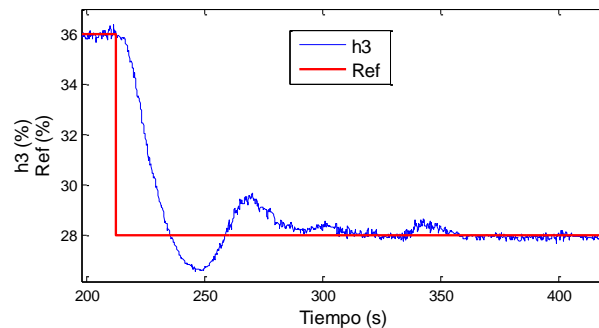


Figura 39. Respuesta del nivel h3 ante un escalón de bajada sintonizado por tanteo

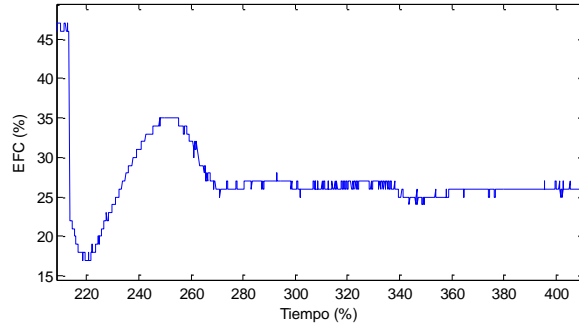


Figura 40. Respuesta del actuador (EFC) ante un escalón de subida sintonizado por tanteo

La respuesta del sistema controlado para un escalón de bajada no se comporta de manera idéntica al paso de subida ya que esta planta, debido al tipo de actuador y a las diferentes características de construcción y funcionamiento, el sistema se comporta diferente cuando llena y cuando vacía el tanque, lo que demuestra que el sistema es no lineal. De igual manera, la respuesta obtenida con este controlador se comporta de manera aceptable ya que el sobrepaso es del 18 % y el error de estado estable es 0 %. El tiempo de estabilización se obtuvo para una banda proporcional del 5 % y fue de:

$$\begin{aligned}
 t_s &= 70.4 \text{ s} , \\
 e_{ss} &= 0 \% , \\
 M_p &= 18 \% .
 \end{aligned}$$

El sistema controlado se comportó de manera deseada mediante la sintonización por el método de tanteo. Esto se debe a que esta sintonización se realiza de manera experimental a partir del comportamiento observado en la planta, y no a partir del modelo obtenido, el cual no representa de manera más precisa el comportamiento de la planta.

7. CONCLUSIONES

En la etapa inicial del proyecto se realizó el proceso de levantamiento de planos, el cual demostró que el diseño inicial del circuito de control y potencia esta erróneo y no cumple con las normas internacionales ANSI e IEC. Por tanto es necesario realizar algunas modificaciones, haciendo correcciones a los diferentes errores encontrados. Los fallos más graves en el diseño fueron el uso de un contactor como sistema de protección general del circuito de potencia, los relés térmicos de protección no están ubicados justo antes del motor tal como recomienda la norma, y el relé térmico 3OL para protección de los dispositivos electrónicos no debería estar donde se encuentra ubicado actualmente, ya que el relé térmico de protección solo se usa para motores; en ese punto se debe ubicar un *breaker* que se ajuste al consumo estimado de los dispositivos electrónicos. Debido a los errores encontrados se plantea el rediseño del sistema eléctrico a partir de las recomendaciones dadas (ver Anexo 3) para que de esta manera el circuito de control y potencia de la planta cumpla con las normas internacionales ANSI e IEC.

El proceso de calibración de la instrumentación fue un paso importante para la puesta a punto de la máquina, ya que estos instrumentos están diseñados para realizar la medida especificada dentro de un rango que podía no ser el adecuado para el módulo. Debido a esto, fue necesario establecer los rangos de trabajo de la máquina y de las diferentes variables que se iban a medir. La calibración fue un proceso delicado y que debió hacerse con el

manual de cada dispositivo a la mano para realizar el proceso de manera adecuada.

En el momento de definir el protocolo de comunicación entre el PLC y el PC para adquisición de datos, se seleccionó el protocolo TCP ya que ambos dispositivos cuentan con el hardware para la implementación de este protocolo. Para establecer una comunicación por TCP es necesario seleccionar un dispositivo como cliente y otro como servidor en la comunicación. Para este caso se seleccionó el PC como servidor y el PLC como cliente ya que luego de realizar diferentes pruebas alternando el servidor y el cliente entre ambos, solo de esta manera se logró la sincronización y la comunicación entre estos.

Toda la instrumentación instalada en el módulo posee protocolo de señal analógica 4-20 mA para comunicarse con el PLC, y fue por esto que todas las lecturas de estos instrumentos debieron hacerse mediante un dispositivo de conversión ADC. Este proceso fue realizado con una resolución de 13 bits para las señales de entrada (transmisores de nivel y flujo), es decir, se escaló la señal analógica en una señal digital que va de 0 a 32768. Para la señal de salida (EFC) se usó el conversor DAC del PLC el cual posee una resolución de 14 de bits.

El diseño de la aplicación del PLC para realizar la comunicación, la conversión ADC de la señal de los transmisores y la conversión DAC para la señal de salida, fue realizada en el entorno de programación TIA Portal V12® debido a que este es el entorno soportado por el dispositivo para el desarrollo de aplicaciones. Para

el PC se seleccionó LabVIEW® ya que este entorno de programación permitió el puerto Ethernet del PC. Además, facilitó la implementación de un sistema SCADA en el PC mediante un lenguaje de programación gráfico el cual se adecuó con los objetivos del proyecto.

La adquisición de datos fue implementada en su totalidad en el PC con el software LabVIEW®, por lo que siempre que se desea almacenar la información de la planta es necesario conectar el PC al módulo y ejecutar la aplicación desarrollada. Esta aplicación permite almacenar las variables medidas en la planta (el nivel en los tanques y el flujo), la señal de salida (EFC) y el *set point* en un archivo de texto que se guarda por defecto en el disco C:\data del computador que este ejecutando la aplicación. Esta aplicación genera también un archivo de texto correspondiente al encabezado del archivo de texto que contiene la información.

Para la implementación del controlador fue necesario realizar diferentes pruebas en la planta, en las cuales se detectó que ambos sensores-transmisores de los niveles en los tanques eran afectados por ruido debido a oscilaciones en el nivel por la descarga del agua. Para corregir este ruido se implementó un filtro físico que permitió que las perturbaciones generadas por la descarga del agua al tanque no afectara demasiado la medida del nivel en este, solucionando el problema en un gran porcentaje pero no en su totalidad. En el momento de realizar la obtención del modelo de la planta, se logró identificar mediante MATLAB® un modelo con una similitud del 85 % en la respuesta. Este error del 15 % se debe a que el ruido en el sensor-transmisor de nivel no permitió obtener una respuesta

clara ya que esta presentaba una pequeña oscilación en el nivel del tanque. El modelo seleccionado fue aquel que presento similitud en la forma de la curva y que pasaba casi por el centro de la oscilación del nivel.

En la aplicación de LabVIEW® se desarrolló también un controlador clásico para realizar pruebas en lazo cerrado. Pero antes de comenzar las pruebas se descartó la implementación de un controlador PID ya que la acción derivativa amplifica el ruido de la planta y en las pruebas en lazo abierto se determinó que el Módulo de Sistema de Tanques en Serie es un sistema muy ruidoso; por lo que solo se realizaron pruebas para controladores PI. La primera sintonización del controlador se realizó aplicando Ziegler Nichols en lazo abierto al modelo de la planta, el cual dio como resultado una $K_p = 8.5 \%^{-1}$ y una $K_I = 1.3 \%s^{-1}$. Las pruebas realizadas a este controlador no dieron los resultados esperados debido a que en el nivel en el estado estable era oscilatorio en una banda de error del 10 % y no del 5 % como se esperaba, además se obtuvo un error de estado de estable considerablemente alto. Probablemente este error en la respuesta se presentó porque el modelo no es una representación totalmente real de la planta. Por tanto, para obtener un controlador que se comportara de la manera deseada, se realizó la sintonización del controlador mediante el método de tanteo, el cual dio como resultado una $K_p = 3 \%^{-1}$ y una $K_I = 1.8 \%s^{-1}$, donde se obtuvo una respuesta del nivel sin oscilación y con error de estado estable casi nulo, tal como se deseaba.

8. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Se recomienda para futuros trabajos en la planta el rediseño y corrección de la instalación eléctrica basándose en las recomendaciones dadas en el Anexo 3 para que de esta manera el sistema de control y potencia de la planta cumplan con las normas internacionales.

El sistema de almacenamiento de datos se implementó en el PC, por lo que no existe forma de almacenar la información de la máquina si no se tiene el PC conectado. Por ello, se recomienda desarrollar la aplicación de almacenamiento de información en el PLC, ya que este permite el uso de una memoria SD extraíble en la cual se pueden guardar los datos.

El controlador PID implementado para las pruebas fue diseñado en la aplicación LabVIEW®. Se recomienda implementar un controlador PID en el PLC ya que este también está en capacidad de controlar la planta. De esta manera se le permite al usuario ampliar la experiencia en sistemas de control, demostrando la variedad de instrumentos que permiten realizar controladores a nivel industrial.

El modelo seleccionado para la representación matemática de la planta, fue un modelo de segundo orden sin retardo, en el cual se obtuvo una similitud del 85 %. Se recomienda realizar diferentes pruebas para obtener diferentes modelos de menor y mayor orden, con y sin retardo, para determinar un comportamiento que represente de mejor manera la planta. A partir de los diferentes modelos se recomienda implementar diferentes métodos de

sintonización de controladores para analizar los diferentes comportamientos de la planta ante estos.

REFERENCIAS

- Abarca, P. (s.f.). *El ABC de la Automatización*. Recuperado el 2015 de Enero de 2015, de Sistemas de Control Automático: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>
- Aström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America.
- Bennet, S. (1984). Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships. *Control Systems Magazine*, 10-15. Recuperado el 10 de Enero de 2015, de <http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Minorsky.pdf>
- Bennet, S. (1993). Development of the PID Controller. *IEEE Control Systems*, 58-64. Recuperado el 10 de Enero de 2015, de <http://www.ieeecss.org/CSM/library/1993/dec1993/w05-HistoricalPerspectives.pdf>
- Buelna Quijada, G. (1995). *Propuesta de diseño y construcción de un sistema de lavado y purificado de gases de combustión, en planta piloto; método de absorción-adsorción*. Hermosillo: Universidad de Sonora - División de Ingeniería.
- Creus, A. (2010). *Instrumentacion Industrial*. Barcelona: Alfaomega Grupo Editor.
- Darpa Internet Program. (Septiembre de 1981). *Transmission Control Protocol*. Recuperado el 12 de Agosto de 2015, de RFC-Editor: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc793.txt>
- Facultad de Veterinaria - Universidad de Zaragoza. (Julio de 2004). *Planta Piloto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de Universidad de Zaragoza: <http://ppcta.unizar.es/presentacion.htm>
- IS_PID. (28 de Enero de 2011). *wikispaces*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de Control-PID: <http://control-pid.wikispaces.com/>
- Kioskea. (Junio de 2014). *Protocolo TCP*. Recuperado el 10 de Agosto de 2015, de Kioskea.net: <http://es.ccm.net/contents/281-protocolo-tcp>
- Montero, A. G. (2005). *Sistemas de medida y adquisición de datos*. Pamplona: Universidad de Navarra.
- National Instruments. (s.f.). *Adquisición de Datos*. (National Instruments) Recuperado el 2 de Julio de 2014, de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Londres: Imperial College press.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Mexico: Prentice Hall Inc.
- Pedrollo. (2011). *CP Electrobombas centrífugas*.
- Siemens. (s.f.). *SITRANS F M MAG 5100W*. Recuperado el 3 de Julio de 2014, de <http://www.automation.siemens.com/mcms/sensor-systems/es/instrumentacion-de-procesos/medicion-de-caudal/electromagneticos/campo-continuo/sensor/pages/sitrans-f-m-mag-5100-w.aspx#Detalles>
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1991). *Control Automático de Procesos - Teoría y Práctica*. Mexico D.F: Noriega Editores.
- Spirax Sarco. (s.f). *Posicionador Electroneumatico Smart SP500. Instrucciones de instalacion y mantenimiento*. Spirax Sarco.
- Universidad de Zaragoza - Area de Ingeniería de Sistemas y Automática. (28 de Febrero de 2001). *Area de Ingeniería de Sistemas y Automática*. Recuperado el 10 de Enero de 2015, de Historia de la Ingeniería de Control: <http://automata.cps.unizar.es/>
- Universidad Nacional de Tucumán - FACET. (s.f.). *UNT-FACET*. Obtenido de Control de Procesos: <http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/>
- Universidad Nacional del Litoral. (3 de Agosto de 2015). *Planta Piloto co-generadora de energia*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2015, de Universidad Nacional del Litoral: http://www.unl.edu.ar/medios/news/view/comienzo_a_funcionar_la_planta_piloto_co-generadora_de_energ%C3%ADa#.VkrAUUnYvdqM
- Vásquez, R. E., Posada, N. L., Castrillon, F., & Giraldo, D. (2014). *Development of a Laboratory Equipment for Dynamic System and Process Control Education*. Medellín.

ANEXOS

ANEXO 1 – Anteproyecto Asistencia en Investigación y Desarrollo en Módulo de Sistema de Tanques en Serie

ANEXO 2 – Planos de la Planta

ANEXO 3 – Correcciones a los planos eléctricos y de control de la planta

ANEXO 4 – Manual de calibración del transmisor de nivel Siemens Sitrans P DS III

ANEXO 5 – Manual de configuración del transmisor de flujo Siemens F M MAG6000

ANEXO 6 – Manual de calibración del posicionador Spirax Sarco SP500

ANEXO 7 – Manual de uso básico del Variador de frecuencia Yaskawa J1000

ANEXO 8 – Manual de uso de la Planta

ANEXO 9 – Diario de Campo

ANEXO 10 – Artículo Publicable

AUTOR



Juan Pablo *RAMÍREZ FRANCO*. Bachiller del Colegio Calasanz, Medellín, Antioquia (2009); estudiante Ingeniería Electrónica (Décimo semestre) de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia. Participante Semillero Microelectrónica (2012). Actualmente

trabaja como profesional en desarrollo y diseño de dispositivos de tecnología de innovación en la empresa Stratos Group S.A.S.