



Tecnura

ISSN: 0123-921X

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Colombia

Garzón González, Enrique Yamid; Cotrino Badillo, Carlos Eduardo  
Aplicación al control de procesos batch  
Tecnura, vol. 18, núm. 1, 2014, pp. 189-204  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257059812015>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Aplicación al control de procesos batch

### Application to batch process control

Enrique Yamid Garzón González\*, Carlos Eduardo Cotrino Badillo\*\*

Citation / Para citar este artículo: Garzón González, E. Y., & Cotrino Badillo, C. E. (2014). Aplicación al control de procesos Batch. Revista Tecnura, Edición especial, 189-204.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### Resumen

En este documento se muestra el diseño e implementación de una plataforma de control para proceso Batch, dicha plataforma de control permite la elaboración y aplicación de secuencias programadas (recetas), así como la modificación y operación de los diferentes lazos de control a partir de las variables de proceso. Para esto, se integraron tres plantas en cascada de análisis de pH, térmica y nivel (flujo de la marca Amatrol que se encuentran en los Laboratorios de la Universidad Distrital, Facultad Tecnológica), la sensorica de campo (RTD, pH metro, medidor de caudal, ultrasonido, presión diferencial) empleada mide de manera continua las variables de la receta a través de los PLC S7-300, y procesa la variable medida en cada uno de los lazos de control. En caso de presentarse alguna variación en el proceso dada por la materia prima, cambios ambientales, etc., el controlador PID y sus variantes regulan el sistema de tal manera que se mantengan las cantidades requeridas de la mezcla, todo por medio del software TIA Portal 12 (Step 7 y WINCC). Asimismo, se puede verificar el histórico de las alarmas y un reporte que indica las recetas generadas con el PLC Siemens (SIMATIC CPU 313C) en el tablero de control, en el PC

con visualización en 42", y en la interfaz hombre – máquina HMI. Esta investigación y su desarrollo fueron co-financiadas con los equipos existentes en los laboratorios de la Universidad Distrital, por un valor aproximado de \$170.000.000 de pesos.

**Palabras clave:** control PD, control PI, control proporcional, control de procesos, sistemas de producción Batch, sistemas SCADA.

#### Abstract

This paper presents the design and implementation of a control platform for Batch process, this control platform enables the development and application of programmed sequences (recipes), as well as the modification and operation of the different control loops from variables in the process. For this, three plants were integrated in a cascade pH analysis-based model, Thermal and Level (Flow of Amatrol brand found in the Laboratories of District University, Faculty of Technology), the field sensor technology (RTD, pH meter, flow meter, ultrasound, differential pressure) used measures recipe variables continuously through the PLC S7-300, and processes the measured variable in each of the control loops. In case of any variation in the process given

\* Ingeniero en control electrónico e instrumentación, especialista en instrumentación electrónica, magíster en ingeniería electrónica. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [eygarzong@udistrital.edu.co](mailto:eygarzong@udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero electrónico, magíster en ciencias de la state. Profesor asociado de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: [ccotrino@javeriana.edu.co](mailto:ccotrino@javeriana.edu.co)

by raw material, environmental changes, etc., the PID controller and its variants regulate the system so that the required amounts of the mixture are kept, all by means of the TIA Portal 12 (Step7 and WinCC). Likewise, it is possible to check the alarms record and a report indicating the recipes generated with Siemens PLC (SIMATIC CPU 313C) in the control panel, in the PC with 42" display, and in the

human-machine interface HMI. This research and its development was co-funded with the available equipment in the laboratories at District University, with an approximate value of (COP) \$ 170 million.

**Keywords:** Batch production systems, PD Control, PI Control, Proportional Control, Process control, SCADA systems.

## INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado una plataforma didáctica (entrenador) emulando un proceso industrial en donde se involucran los equipos, actuadores y sensores que a continuación se referencian, así como un marco conceptual asociado a los procesos de automatización.

La integración de los tres niveles de la estructura jerárquica de automatización, esto es, los niveles de campo, de control y de supervisión junto con la generación de un control de proceso de tipo Batch, teniendo en cuenta lazos de control para sistemas de pH, térmicos, nivel y flujo, involucrando sensores y actuadores, controladores lógicos programable PLC, interfaz humano-máquina (HMI) a través de medios de comunicaciones industriales, se pueden estudiar con el modelo de plataforma didáctica, cuyos componentes se describen a continuación.

## CONTROL BATCH

Generalmente se entiende como sistemas Batch aquellos sistemas de control que gestionan y ejecutan una fabricación acotada, en número de unidades o en tiempo, de un determinado producto de características predefinidas por una fórmula o especificación (Rockwell Automation, 2003). A estas producciones se les asigna una matrícula que identifica a todos los componentes que forman parte de la fabricación. También pueden utilizar sistemas

Batch para procesos continuos, consiguiendo de algún modo ordenar y secuenciar la utilización de las instalaciones que forman parte del proceso productivo (Chacon R, Rondon M, Quintero G, & Rojas A, 2009)(Holy & Pozivil, 2002).

Dentro de la pirámide de automatización, estos sistemas están comprendidos entre la parte de supervisión (sistemas Scada) y la parte de MES (gestión y ejecución de la información de planta), (Fonseca Velasquez & Fino Sandoval, 2003), (Garzón Gonzalez, Camargo Casallas, & Bejarano, 2011). La parte de supervisión es la encargada de ejecutar las órdenes hacia los sistemas de control, la parte de MES es la encargada de recoger, almacenar y empaquetar la información procedente de los sistemas de control durante la fabricación del Batch. Al tratarse de sistemas con capacidad de decisión, a cuanta más información puedan acceder, mayor criterio tienen para decidir. Deben ser capaces de comunicarse con otros sistemas de fábrica. Es probable que deban comunicarse con sistemas corporativos para conocer el estado de los stocks de las materias que se pretende utilizar para la fabricación. También es probable que dichos sistemas corporativos requieran que el sistema Batch les reporte las cantidades realmente utilizadas de cada material (Behary, Ah King, & Rughooputh, 2004). También deberán comunicarse con los sistemas de control de calidad para avisarles que se debe efectuar algún test y con otros departamentos que intervienen en el ciclo de producción. El

sistema de control Batch es un sistema de control de procesos de producción por lotes cuyo estándar queda definido en la normativa ISA.S88. Se basa en la ejecución de una receta de producción, garantizando la trazabilidad y seguridad del sistema (Chacon R, Rondon M, Quintero G, & Rojas A, 2009).

En un proceso Batch se ejecuta una secuencia de operaciones encadenadas, cada una de las cuales está controlada por una o varias fases que realizan funciones simples como carga de agua, adición, agitación, calentamiento, enfriamiento, mezcla, etc. (Serna Quilindo, Vergara González, & Flórez Marulanda, 2011). En el sistema de gestión Batch el operador podrá seleccionar, previa autorización, la receta de producción, la fórmula y ejecutar en modo automático o manual las distintas secuencias de operación (Ibrahimkadiü & Kreso, 2011) (Deitz, Todd, & Murray, 2003).

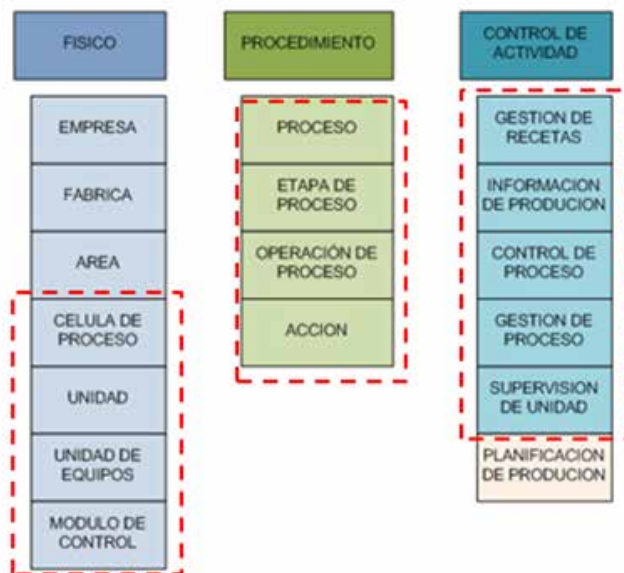
En la figura 1 se presenta un resumen que describe el modelo de proceso batch acorde con la norma ISA-S88 dada en sus apartes: Parte 1. Modelos,

definición de términos, tipos de recetas, secuencia de actividades; Parte 2. Estructura de datos, estructura de lenguaje, materiales (entradas, parámetros y salidas); Parte 3. Implementación, receta, estructura de fabricación; Parte 4. Registro de producción, lote, identificación de objetos, descripción de clases de objetos y atributos.

## METODOLOGÍA

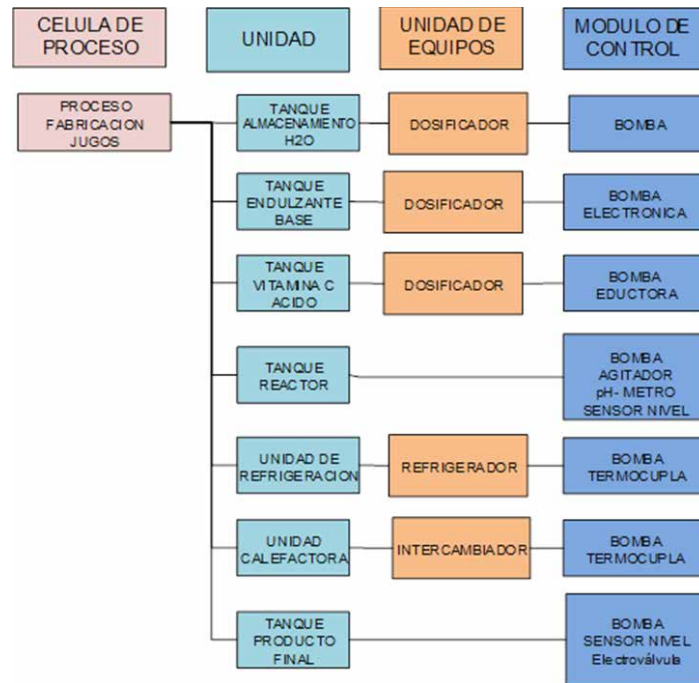
El sistema de control Batch desarrollado permite procesar la información y operar en tiempo real bajo un sistema de automatización realizando tareas de control, supervisión y monitoreo constante al proceso, permitiendo desarrollarse como una herramienta práctica en la enseñanza de procesos industriales a manera de entrenador.

En la figura 2 se muestra el modelo físico de la solución propuesta; en él se propone una solución para la fabricación de jugos, el modelo descrito presenta las unidades, los equipos y el módulo de control.



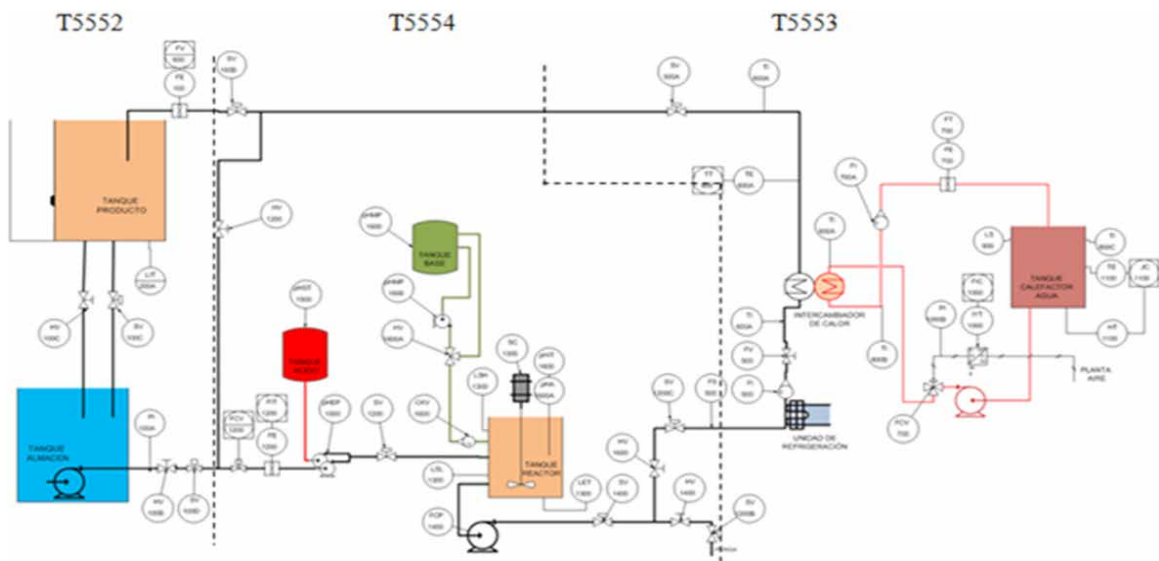
**Figura 1.** Descripción de un proceso batch – ISA-S88.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 2.** Modelo físico del control batch.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Diagrama P&ID de las plantas en cascada para control Batch.

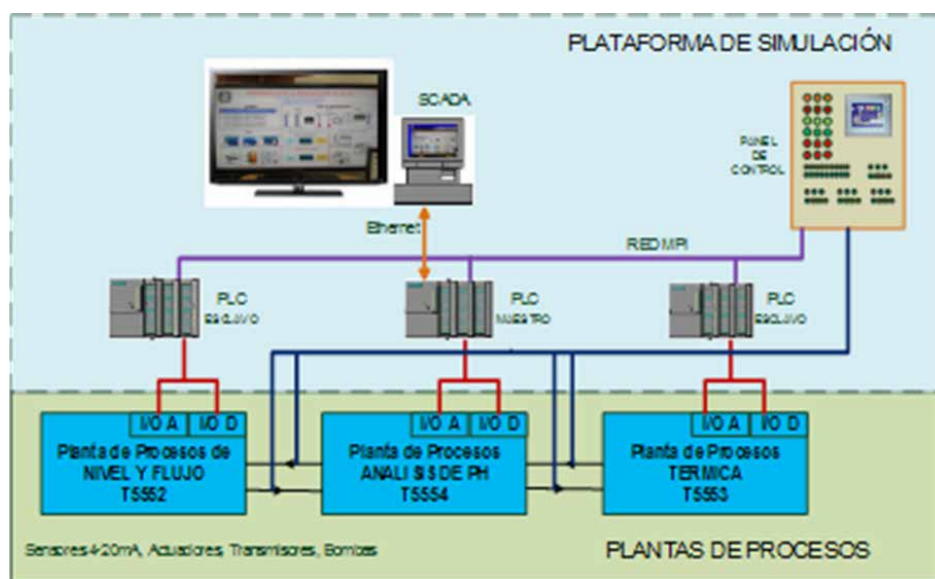
**Fuente:** Elaboración propia.

Se integraron tres plantas de procesos AMATROL.INC. en cascada; en la figura 3 se presenta el diagrama P&ID de las plantas: Nivel flujo (T5552), Análisis de pH (T5554) y térmica (T5553), con otros equipos e instrumentos, PLC Siemens (SIMATIC CPU 313C), tablero de control, PC con visualización en 42" y la Interfaz hombre-máquina HMI, todo por medio del software TIA Portal 12 (Step 7 y WINCC). Dicha plataforma de control permite la elaboración y aplicación de secuencias programadas (recetas) y la modificación y operación de los diferentes lazos de control a partir de las variables de proceso.

Ya que las tres plantas de procesos son sistemas independientes se puede desarrollar lazos de control abiertos y cerrados o controles ON/OFF, permitiendo observar y evaluar los diferentes elementos de un sistema control y automatización como sensores, transmisores, registradores e indicadores y actuadores; en la figura 4 se muestra como se enlazaron las tres plantas en un proceso de automatización a partir de la medición de las diferentes variables como temperatura, nivel,

caudal, flujo y pH por medio de diferentes principios de medición como de diferentes sensores, con indicadores locales para monitoreo, transmisores industriales de 4-20 mA y elementos finales de control como bombas, válvulas proporcionales y electroválvulas, todo esto controlado por medio de los PLC S7-300 SIEMENS a través de los lazos de control abiertos, cerrados u on/off, que por medio de una comunicación industrial Ethernet enlaza un PC con el PLC maestro, permitiendo implementar el control por lotes (control batch) para todo el sistema; a su vez se incorporó una interfaz hombre-máquina (HMI) para supervisión y monitorero, ayudando a monitorizar la capacidad de proceso, el rendimiento y la calidad del producto y al mismo tiempo reducir las variaciones del proceso y las intervenciones humanas.

La plataforma de simulación fue desarrollada bajo un control de proceso batch, en donde se mide de manera continua las variables de proceso y se genera la receta de manera secuencial, como se muestra en el diagrama de procesos (tabla 1) y el usuario define la mezcla requerida y la cantidad.



**Figura 4.** Red multi-sistema.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Tabla 1.** Diagrama de procesos.

| PROCESO             | ETAPA DE PROCESO                       | OPERACIÓN PROCESO                                       | ACCIÓN DEL PROCESO   |
|---------------------|--|---|--|
| FABRICACIÓN DE JUGO | Tanque de almacenamiento materia prima | Cargar tanque de almacén con jugo (agua y jugo natural) | Llenar tanque depósito 50 litros de jugo. Transfiere hasta 20 litros al tanque reactor.  |
|                     | Tanque endulzante (base)               | Adicionar endulzante (carbonato de sodio)               | Bomba dosificadora transfiere al tanque reactor en un porcentaje de 40% en un rango de 0-100% y con un control de 4-20 mA de acuerdo con la receta solicitada.           |
|                     | Tanque vitamina C (ácido)              | Adicionar vitamina C (bisulfato de sodio)               | Bomba Eductora transfiere a la línea de proceso a diferentes rangos de mezcla de acuerdo con el flujo del líquido en un rango de 0-2 GPM para una dosificación de 67-2,5 |
|                     | Tanque reactor                         | Mezcla de agua-jugo y endulzante y vitamina C           | Agitar contenido de la mezcla y se adiciona base para encontrar el pH de la receta deseada.  |
|                     | Unidad de refrigeración                | Pasa por el refrigerador de placas                      | Se activa si la temperatura deseada en la receta está por encima de la temperatura ambiente (rango de 5° C – T° amb.)  |
|                     | Unidad calefactora                     | Pasa por el intercambiador de calor de placas paralelas | Se activa si la temperatura deseada en la receta está por encima de la temperatura ambiente (T° amb. 80 °C)  |
|                     | Tanque producto final                  | Llena el tanque y dosifica en cantidades de 1 litro     | Llenado tanque de producto hasta un máximo de 20 lt y dosificación en cantidades de 1 lt.  |

**Fuente:** Elaboración propia.

Para lograrlo se integraron las tres plantas de procesos (nivel-flujo, análisis de pH y térmica), se conectaron en cascada, el control se realiza a través de un PLC maestro y dos esclavos interconectados por MPI y supervisados por la pantalla HMI y un PC con un pantalla 42", que se comunica con el PLC maestro a través de Ethernet; desde allí se controla todo el sistema, se generan recetas, supervisa las variables de proceso, verifica y modifica los lazos de control permitiendo llevar registro histórico del proceso y las alarmas.

Los módulos de control de proceso batch se toman a partir de los sensores de campo (RTD, pH metro, medidor de caudal, nivel por ultrasonido o presión diferencial); estos miden de manera continua las variables de la receta a través de los PLC S7 300 y procesa la variable medida en cada uno de los lazos de control; en caso de presentarse alguna variación en el proceso dada por la materia prima, cambios ambientales, etc., el controlador PID y sus variantes regulan el sistema de tal manera que se mantengan las cantidades requeridas de la mezcla.

La plataforma permite variar las constantes P, I, D de los lazos de control, así mismo puede verificar el histórico de las alarmas y un reporte que indica las recetas generadas; en conclusión, los históricos de producción.

## Descripción de las plantas de procesos

El Sistema de Control de Procesos de Flujo y Nivel (T5552 de AmatrolInc) incluye una estación de trabajo, un panel de control, instrumentos industriales montados y cableados en un circuito cerrado, para controlar el flujo de agua entre dos tanques o el nivel de líquido en un tanque, este nos permite medir señales y conectar los dispositivos en una amplia variedad de configuraciones de control, y ofrece 3 tipos de controladores: control por relé, uno estándar y un controlador de tipo PID. El control por relé incluye interruptores manuales de entrada, válvulas de solenoide y flotadores para realizar encendido o apagado automático de control de nivel de líquido. La opción de controlador PID permite un

control programado de cualquiera de los niveles de líquido o flujo (Amatrol Inc., 2013).

El Sistema de Control Proceso Térmico (T5553 Amatrol Inc) permite calibrar, ajustar, instalar, operar y optimizar los sistemas de control de procesos térmicos en aplicaciones industriales. Todos los componentes eléctricos están conectados al panel de control para permitir medir las señales y conectar los dispositivos en lazos de control de tipos PID, On /Off y control manual. El T5553 enfría el fluido del proceso a través de un sistema de refrigeración mecánico donde es menos afectado por las temperaturas del medio ambiente elevadas y puede proporcionar una refrigeración continua del proceso. Cuenta con sensores de temperatura como termopar, termistor y RTD donde se puede acceder directamente desde el panel e interconectar a un transmisor programable para la conversión a una señal de 4 -20 mA. Un intercambiador de calor industrial y la válvula de control proporcional permiten observar lo que está sucediendo en el interior del sistema y entender más claramente los efectos por las perturbaciones externas y de sus propios ajustes (Amatrol Inc., 2013).

El sistema de Control Analítico pH (Ref. T5554 de AMATROL Inc.) permite evaluar conceptos de control analítico en situaciones industriales, a través de variables como nivel, caudal, temperatura y pH. El control de procesos es fundamental en las industrias química, energía, productos farmacéuticos, tratamiento de aguas, procesamiento de alimentos, entre otras, y así mismo permite al estudiante hacer un análisis de riesgos, controlar los flujos a través de las bombas de inyección de los tanques del ácido y la base; la medición se hace mediante dos electrodos, uno en tubería y el otro sumergido en el tanque reactor de mezcla de pH. El T5554 incluye una estación de trabajo de mesa con la parte superior de un panel de control, bombas de inyección, un reactor continuo de tanque agitado (CSTR), el transmisor y la sonda de pH, depósitos de reactivos. Los estudiantes pueden crear lazos de procesos reales que los preparan para usar aplicaciones de procesos industriales y les

enseñan a utilizar esto para mantener soluciones mixtas a concentraciones deseadas, manteniendo los límites de nivel superior e inferior para evitar desbordamiento o fallas de la bomba en vacío (Amatrol Inc., 2013).

## **Instrumentos de proceso**

A continuación se presentan en la tabla 2 los instrumentos de proceso utilizados en el desarrollo de la aplicación de control Batch.

## **Calibración de los sensores**

Las plantas de control de procesos T5552, T5553, T5554 de Amatrol Inc. cuentan con diferentes tipos de sensores; a continuación se explica la metrología aplicada en los sensores utilizados en el desarrollo del proyecto; sensor de nivel de ultrasonido y por presión diferencial, sensor de pH, sensores de caudal y RTD con transmisores de temperatura.

Se realizó un proceso de linealización para obtener la ecuación característica de cada uno y poder mostrar la lectura en la interfaz gráfica de usuario desarrollada para el PLC.

Además de ello se hizo calibración y ajuste del transmisor de flujo y pH, tratando de corregir el error del instrumento para lograr medidas en el experimento de identificación con mayor precisión.

En la tabla 3 se describen las características técnicas de cada sensor utilizado para hacer una caracterización de los instrumentos de medida de los que dispone el sistema de control T5554.

La linealización del transmisor de flujo se realizó a partir de la comparación de la señal del transmisor de flujo vs. rotámetro en un lazo cerrado de flujo en donde se compara la cantidad de GPM (galones por minuto) que pasan por el rotámetro y se tomó la misma medida en el transmisor comparando la señal de entrada (GPM) y salida corriente (mA). Se obtiene la función de la pendiente para programar el lazo de flujo en el PLC.

Para la calibración de los sensores de nivel (sistemas T5552 y T5554) se utilizó como guía la escala



**Tabla 2.** Instrumentos de proceso.

| Nombre                                   | Descripción  |
|--|--|
| Bomba sumergible                         | La bomba situada en el interior del tanque de depósito es de tipo centrífuga y bombea agua desde el tanque de almacenamiento a la red de tuberías, conexión a 110 VAC, caudal aproximado de 3 gpm, 0-20 psi  |
| Sensor ultrasónico                       | El sensor de ultrasonido proporciona una señal de retroalimentación de 4-20 mA que es proporcional al nivel del líquido en uno de los tanques. Este transductor se monta convenientemente a una distancia ajustable en la planta.  |
| Válvula neumática reguladora de flujo    | Este actuador es necesario para realizar el control de flujo que llega a los diferentes sensores para la medición con el transmisor inteligente de flujo.  |
| Conversor I/P                            | Un convertidor I / P es un acondicionador de señal que recibe una señal analógica eléctrica de 4-20 mA y la convierte en una señal neumática; esta señal es utilizada para controlar la válvula neumática.   |
| Rotámetro                                | El rotámetro indica la velocidad de flujo a través del bucle principal del proceso en una escala. También cuenta con una válvula de cierre ajustable que proporciona un medio para ajustar manualmente la velocidad máxima del flujo dentro del bucle principal del proceso.   |
| Tanque de reactivo del proceso principal | Este depósito contiene el reactivo (bisulfato de sodio) usado para bajar el pH del proceso. El depósito está conectado a la bomba depuradora con una manguera flexible. Normalmente se carga hasta 6 L y se agrega bisulfato de sodio hasta 600 mL.  |
| Bomba depuradora                         | También conocida como bomba de inyección, la bomba inyecta un volumen seleccionable del reactivo en el proceso a una velocidad (frecuencia) determinada por el flujo, y tiene un interruptor para encender o apagar la bomba.  |
| Bomba de circulación                     | La bomba de circulación hace circular el fluido a través del bucle principal de proceso.   |
| Válvula solenoide                        | Las válvulas solenoides se encuentran una al lado de la entrada del depósito del reactor y la otra al lado de la salida del tanque del reactor. Sirven para evitar el paso del líquido hacia el tanque en caso de que esté lleno y para proteger la bomba en caso de que esté vacío. 10 V-24 V   |
| Sensor de flujo                          | Este es un sensor de flujo de paletas que convierte el caudal a través de la tubería principal en una señal de 4-20 mA   |
| Válvula proporcional                     | El actuador proporcional permite a la válvula de solenoide operar de manera gradual mediante una señal de 4 -20 mA.  |
| Depósito de reactivo                     | Este depósito tiene el reactivo (carbonato de sodio) que neutraliza el ácido para elevar el pH del proceso. El depósito está conectado a la bomba dosificadora electrónica con mangueras, una transparente (conduce agua) y una de color blanco (conduce aire). 0-12 L   |
| Bomba dosificadora electrónica           | La bomba dosificadora electrónica mezcla una cantidad de reactivo con el líquido que se encuentre en el tanque de proceso inyectando una cantidad de volumen de reactivo en el depósito de reactor a una velocidad establecida por el usuario; puede ser operada manualmente o en modo automático utilizando una señal de control de 4-20 mA.  |
| pH metro                                 | Electrodo de pH Honeywell Durafet, es un electrodo de estado sólido que utiliza un tipo especial de transistor llamado transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET). Conectado con el electrodo, hay una indicación del transmisor que muestra el nivel de pH medido por el electrodo y transmite una señal de 4-20 mA que representa la medición del pH.  |
| Tanque reactor de proceso                | El tanque reactor del proceso mantiene el fluido del proceso y permite que los reactivos se mezclen en él; incluye un agitador para mezclar el reactivo. El tanque reactor también incluye interruptores de nivel alto y bajo, así como un sensor de presión/transmisor montado en la parte inferior del tanque para medir el nivel del tanque. Capacidad del tanque, 0-12 L. Rango del sensor, 4-20 mA, interruptor de nivel off/on, 0-24 V |
| Válvula reguladora neumática             | Válvula reguladora de caudal del lazo de control de temperatura activada neumáticamente.   |
| Intercambiador de calor                  | El intercambiador de calor consta de un intercambiador tanque depósito con resistencia interna de calefacción y circuito de tubería de alta temperatura; rango de temperatura, 23 °C hasta 70 °C.  |
| Unidad refrigeradora                     | Unidad de condensación de tipo axial, rango de 3 °C a temperatura ambiente.  |
| RTD                                      | Sensor de temperatura PT100 montado en línea de proceso, con transmisor de 4-20 mA.  |

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Datos técnicos.

|              | Sensor ultrasonido | Transmisores de flujo | pH_metro | Sensores de nivel P. diferencial | Transmisores de temperatura |
|--------------|--------------------|-----------------------|----------|----------------------------------|-----------------------------|
| Resolución   | 0,0005             | 0,0005                | 0,0005   | 0,0005                           | 0,0005                      |
| Sensibilidad | 1 mL               | 1 m GPM               | 7 m      | 6.5 mL                           | 0,1 °C                      |
| Precisión    | 0,001              | 0,298%                | 1,597%   | 8,6879%                          | 0,05%                       |

**Fuente:** Elaboración propia.

de un recipiente marcado, se verificó el volumen de líquido en el tanque reactor por cada variación de corriente del sensor de nivel por presión diferencial, para poder determinar la cantidad de líquido que puede almacenarse dentro de este y el valor en corriente del sensor por cada valor de volumen de agua conocido en varios puntos diferentes de la escala para efectuar la linealización del sensor.

Para hacer la linealización de nivel por presión diferencial se tomó como patrón de referencia el tanque de agua que tiene una regla de indicación de capacidad de 24 litros, en donde se encuentra instalado el sensor, se hace una comparación en el rango del sensor de 4-20 mA, donde se toma un máximo de 10 niveles.

Para la linealización del sensor de ultrasonido se aplicó el mismo proceso del sensor de nivel por presión diferencial.

Para la calibración del sensor de temperatura (sistema T5553) se utilizó como guía la escala de un termómetro bimetalico, se verificó el rango de trabajo entregado por el transmisor de temperatura de 4-20 mA, según la indicación del termómetro bimetalico.

Para el sensor de temperatura RTD se hizo una programación al transmisor a partir de la hoja técnica del fabricante de las plantas y posteriormente se hizo la comparación con un termómetro de indicación local montado en la línea de proceso; esto se verificó en un lazo cerrado de temperatura.

Para la calibración del sensor de pH (sistema T5554) se utilizó una solución buffer (pH = 4 y pH = 7), se verificó el nivel de concentración de pH

con el transmisor de pH en dos puntos diferentes para hacer la linealización del sensor.

El pH utilizó dos buffer de 4 y 7 dados por el fabricante de las plantas para la calibración de este sensor y de igual forma se tomaron datos en un lazo cerrado de pH y se validó los datos para linealizar el sensor.

Para la linealización del sensor de flujo de pH se hizo a partir de la comparación de la señal del transmisor de flujo vs. rotámetro en un lazo cerrado de flujo en donde se compara la cantidad de GPM (galones por minuto) que pasan por el rotámetro y se toma la misma medida en el transmisor, la señal de entrada (GPM) se compara con la salida corriente (mA).

### Software del PLC e interfaz gráfica

Para el desarrollo de la aplicación del PLC e interfaz gráfica se escogió el modelo de cascada, conocido también como modelo lineal secuencial o ciclo de vida clásico; se ha tomado este modelo como referencia debido a que permite el desarrollo secuencial de la aplicación, lo cual parece ventajoso para no incurrir en errores al tratar de incursionar en otras etapas sin haber completado otras necesarias, lo que garantiza que al finalizar el desarrollo de la aplicación todas las etapas estén terminadas y las aplicaciones funcionan a 100%.

Proponiendo un enfoque metodológico que ordena rigurosamente las fases del proceso para el desarrollo de software, de tal forma que el inicio de cada fase debe esperar la finalización de la fase

anterior, las fases que se tuvieron en cuenta fueron: Fase I, Análisis de requisitos; Fase II, Diseño del sistema; Fase III, Diseño del programa; Fase IV, Codificación; Fase V, Pruebas; Fase VI, Implementación (Ponsa & Granollers, 2009).

## Aplicación HMI

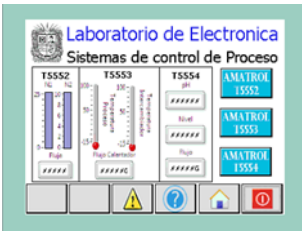
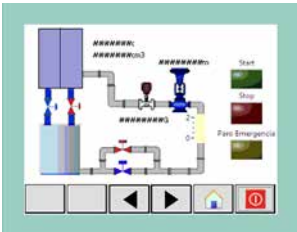
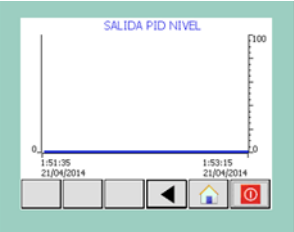
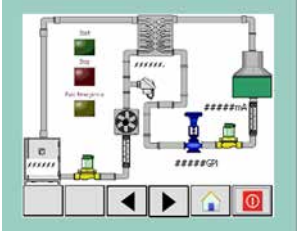

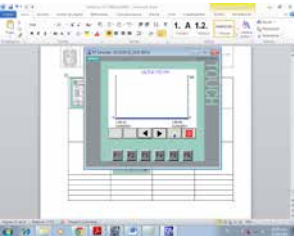
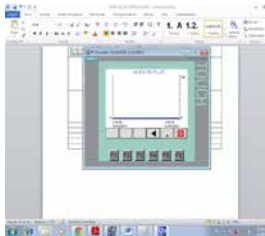
La aplicación destinada a la monitorización de los sistemas de control de proceso se compone de una pantalla de inicio, la cual tiene tres botones y cuando se selecciona uno de ellos, redirigen la pantalla al mímico correspondiente al sistema de control de proceso seleccionado (ver la tabla 4); una vez abierto este se generan dos botones que permiten el avance y el retroceso entre imágenes.

La pantalla principal muestra el valor numérico de cada variable de proceso debido a que es la más importante dentro de la funcionalidad del sistema, además en la parte inferior tiene un botón para activar un menú de ayuda y otro para mostrar las advertencias de posibles errores que pueda tener el sistema.

En el primer nivel se observa la conectividad de la tubería y el valor de cada variable de proceso, además de indicar si la planta está activa o no lo está.

En el segundo nivel se observa el gráfico de comportamiento contra tiempo de cada variable de proceso sobre la cual se está efectuando alguna acción de control.

Tabla 4. Niveles.

| PANTALLA DE INICIO   | PRIMER NIVEL  | SEGUNDO NIVEL   |
|--|---|---|
|   |  |   |
|  |  |   |
|  |   |  |

Fuente: Elaboración propia.

## Aplicación PC

El primer nivel o pantalla principal (ver la figura 5) se compone de un menú de selección de sistemas y las indicaciones de los instrumentos más importantes que tiene cada sistema de control, además de botones de selección que permiten conocer la posición inicial de las válvulas manuales.

Este primer nivel se subdivide en varios paneles entre los cuales se encuentran: un panel de visualización de alarmas, el cual muestra cada evento que ocurre sobre la red de elementos de control y/o posibles errores de los mismos.

El segundo nivel muestra el mímico relacionado al lazo de control de cada sistema de control y

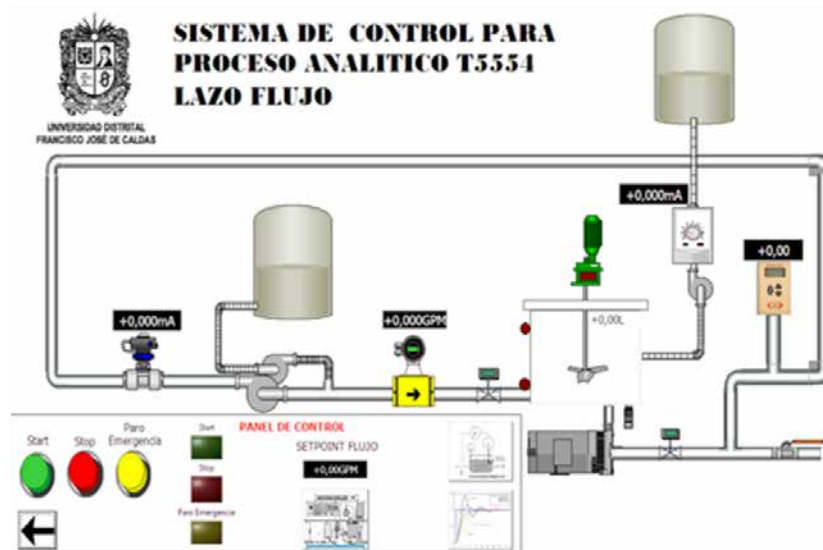
cuenta con un panel de control para operar cada sistema en forma remota (figura 6). En la parte inferior se encuentra un panel de control que cuenta con unos botones de Start, Stop y Paro de emergencia, luego un menú de selección de estrategia de control, la cual se aplicará sobre la variable de proceso a la cual pertenezca la visualización y, por último, una caja de texto que permite digitar el valor de consigna o valor a reflejar sobre el lazo de control.

El tercer nivel (figura 7) depende de la selección hecha en el segundo nivel ya que se puede escoger la visualización del sistema en forma de PI&D, gráfico de control o la fotografía del sistema de control.



**Figura 5.** Pantalla principal o primer nivel.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Selección de lazo.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 7.** Gráfico de control.

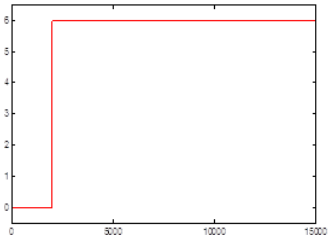
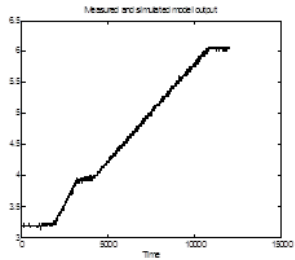
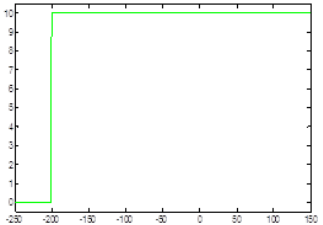
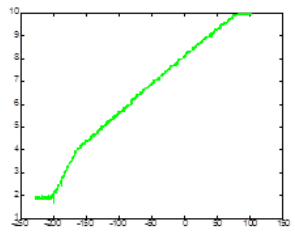
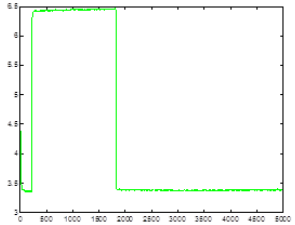
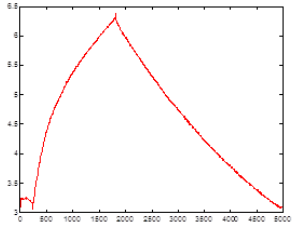
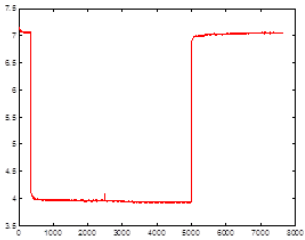
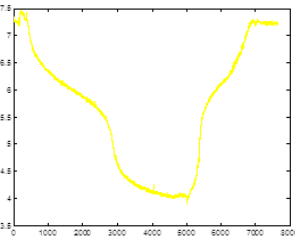
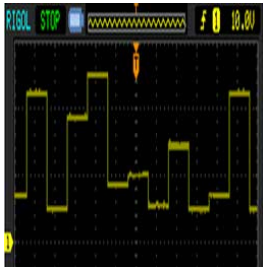
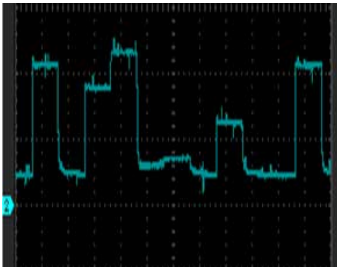
**Fuente:** Elaboración propia.

## RESULTADOS

En el caso de los lazos de pH y temperatura no se realizaron muchas oscilaciones debido a que el proceso es lento y se tendrían las siguientes eventualidades.

Los reactivos de los tanques de almacenamiento por el tamaño de estos últimos se acaban los reactivos, se debería agregar más reactivo a los tanques, lo que ocasionaría errores en el experimento; por tanto, se optó por dejarlo en un intervalo de 0-10 min, rango

**Tabla 5.** Respuesta de los lazos de control, una señal pulso.

| LAZO O ACTUADOR  | RANGO         | SEÑAL DE ENTRADA   | SEÑAL DE SALIDA   |
|--|---------------|--|---|
| Tanque con perturbaciones T5552 (sensor presión diferencial) | 0 L–25 L      |    |    |
| Tanque con perturbaciones T5552 (sensor ultrasonido)         | 0–10 L        |    |    |
| Temperatura tanque de proceso T5553                          | 0–60 °C       |   |   |
| pH tanque reactivo T5554                                     | pH Buffer 4–8 |  |  |
| Flujo T5552 y T5554  | 0–2 GPM       |  |  |

**Fuente:** Elaboración propia.

en el cual los reactivos no se acabarán y se puede visualizar la respuesta del lazo en un rango de trabajo de 4-7 en la escala de pH.

En el caso del lazo de temperatura, la variación de temperatura en ascenso y en descenso es bastante lenta (alrededor de 2 horas para recorrer todo el rango desde 0 C° hasta 100 C°), por consiguiente se hizo con una variación de 0 hasta 60 C° con una duración de 1.2 horas.

A continuación se muestra en la tabla 5 la respuesta de los lazos de control, una señal pulso.

El desarrollo de la estación maestra de supervisión y control se muestra en la figura 8; esta se desarrolló en TIA Portal software ofrecido por Siemens y que integra las herramientas necesarias

para el diseño de entornos de visualización y control junto con la programación de paneles táctiles que permiten la implementación de una automatización completa.

Para el desarrollo del sistema de supervisión y control se ha hecho uso del software WinCC Runtime Advanced que se encuentra incorporado en el TIA (Totally Integrate Automation), software de Siemens que permite el desarrollo de Sistemas PC con las siguientes características.

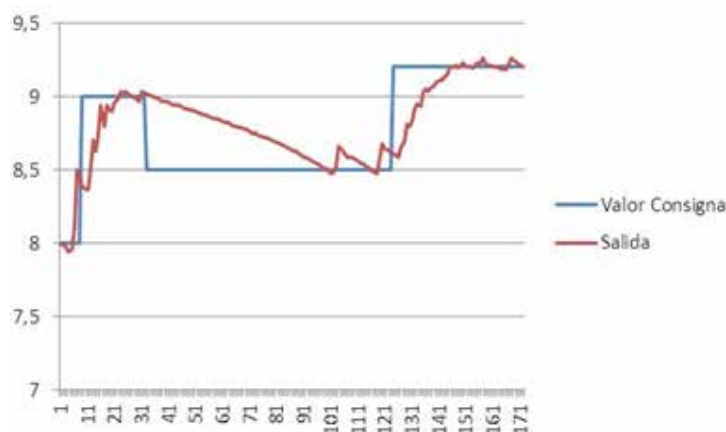
### Controlador ON\_OFF

Este controlador se implementó en el lazo de pH debido a que es un proceso lento ya que al



**Figura 8.** Interconexión del sistema.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9.** Respuesta ON\_OFF.

**Fuente:** Elaboración propia.



tratar de hacerlo con el lazo de flujo el sistema se tornaba inestable. Los resultados obtenidos con este controlador se presentan en la gráfica mostrada a continuación, en donde se refleja un error de estado estacionario promedio de 3% y el sistema se torna oscilante alrededor del punto de valor de consigna, pero en general el controlador sigue a la entrada y es bastante fácil de implementar cuando se requieran aplicaciones de control rápidas (ver la figura 9).

Funciona controlando la bomba dosificadora electrónica ya que cuando el sensor de pH detecta que está por debajo del nivel de pH, la frecuencia de dosificación es máxima para lograr subir el nivel de pH, y cuando es al contrario la apaga y espera que el ácido proveniente de la bomba reductora baje el nivel de pH.

## CONCLUSIONES

Para obtener las características de operación de los sensores en los lazos de control se deben establecer condiciones ambientales similares, debido a que la respuesta del sistema puede influir como una perturbación adicional al sistema y el error en la medición se introduce en las ecuaciones programadas en el PLC.

Para el lazo de control de pH, siendo la variable más relevante del proceso se encontró que una vez sintonizado la respuesta mantiene algunas oscilaciones de baja amplitud; se analiza que la causa es la concentración de ácido y base presentes en los tanques de almacenamiento, a medida que estos son agregados al tanque de proceso la señal crece y decrece de manera aleatoria debido a que la frecuencia en que se agregan los reactivos a la mezcla es automática, pero el ajuste de la cantidad se hace de manera mecánica y no hay una forma de ajustarlo en un valor deseado sino de un valor predeterminado.

A través del análisis comparativo de los lazos de control PI, PD, PID obtenidos durante el desarrollo del proyecto, contra los lazos de control AMATROL® se observa una mayor tendencia de

estabilización, debido a la disminución de sobre-impulso y el error de estado estacionario.

En general, las líneas del proceso Batch de los tanques deben ser purgadas ya que cuando se hace un cambio de agua o se remplazan los instrumentos, se comprobó que las bombas se llenan de aire y producen un fenómeno de cavitación y ocasiona caídas del flujo nominal en los lazos del proceso; por consiguiente, cada vez que se haga el cambio de agua hay que establecer condiciones de operación.

El SCADA de desarrollo mediante el paquete de software de Siemens TIA Portal V12 permite el desarrollo completo de sistemas de control y supervisión. La programación e interconexión de dispositivos y diseño de entornos gráficos permiten la interacción en entornos académicos e industriales.

Mediante la realización de una encuesta se logró determinar el nivel de aceptación de esta herramienta en el programa académico de ingeniería en control, determinando su pertinencia en asignaturas como: sensores y actuadores, instrumentación industrial, instrumentación de procesos, automática y redes industriales.

## FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- amatrol Inc. (2013). Analytical Process Control Student Reference. Jefferson Village, Indiana, U.S.A.
- Behary, M.; Ah King, R., & Rughooputh, H. (2004). Automatization of sugar boiling process in batch vacuum pans using ABB-Freelance PLC (AC800F) and conductor NT SCADA. *Industrial Technology*, pp. 853-858, Vol. 2. IEEE International Conference.
- Chacon R., E. A.; Rondon M., I. V.; Quintero G., K. R., & Rojas A., O. A. (2009). Aplicación del estandar ISA88 en el modelado del proceso de producción de azúcar en un Central Azucarero. *7th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, p. 10. San Cristóbal, Venezuela.



- Deitz, C.; Todd, H., & Murray, S. (2003). Writing a Functional Specification for an S88 Batch Project. *Chemical Engineering*.
- Fonseca Velásquez, A., & Fino Sandoval, R. A. (2003). *Red de datos para instrumentación*. Bogotá: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital.
- Garzón González, E. Y.; Camargo Casallas, E., & Bejarano, E. H. (2011). *Estudio, diseño e implementación de una red industrial para robot FIREBOT*. Bogotá: Fondo de Publicaciones de la Universidad Distrital.
- Holy, R., & Pozivil, J. (2002). Batch control system project for a project for a pharmaceutical plant. *ISA Transactions*, 245-254.
- Ponsa, P., & Granollers, A. (2009). *Diseño y Automatización Industrial*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rockwell Automation (2003). The ISA S88 Standard A Roadmap for automation a Powerful Management tool. *Benefits of Manufacturing Control*, 1-17.
- Serna Quilindo, W. Y.; Vergara González, D. C., & Flórez Marulanda, J. F. (2011). Procedimiento de Modelado ISA S88 para Ejecución de Órdenes de Producción Basadas en Récpes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 107-129.

