

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DEL SISTEMA DE CAUDAL

Carvajal Cabrera Christian P., Proaño Alomaliza Luis E., *Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE-L, Latacunga – Ecuador.*

Resumen - El presente documento se centra en el diseño e implementación de un módulo didáctico que permite el monitoreo y control automático de caudal, para el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE extensión Latacunga, puesto que en la actualidad el sector industrial ha migrado a procesos automatizados para mantener variables dinámicas en rangos establecidos con el objetivo de obtener un producto final en buen estado, estandarizado y proteger tanto al operador como a la maquinaria, para ello es indispensable que los estudiantes conozcan las ventajas, desventajas y características de los diferentes métodos de control con procesos que simulan de manera compacta sistemas industriales.

Palabras claves — Críticamente amortiguada, Lógica Difusa, PID, Predictivo MPC.

I. INTRODUCCIÓN

Con la aparición de los controladores electrónicos analógicos y digitales se logró mejorar la seguridad, flexibilidad y economía en las industrias haciendo de sus sistemas más robustos logrando estandarizar sus productos [1] por medio de estrategias de control que se han desarrollado a la par con la tecnología: *i) controladores PID* considerados tradicionales, puesto que en la industria están en un 95 % por sus características y robustez en cierta medida, con alta estabilidad en sistema de primer orden [2]; y *ii) controladores avanzado* se caracterizan por que son capaces de manejar más de una variable a la vez y son usados para modelos no lineales: *j) Lógico Difuso o expertos* que mejora los tiempo de respuesta del proceso, con gran sensibilidad a cambios de la variable del proceso [3]; *jj) Control predictivo o MPC*, se caracteriza por utilizar un modelo matemático para predecir el comportamiento del sistema, así define un horizonte de predicción y de control [4].

Para un estudio de la dinámica de variables físicas y estrategias de control es necesario la implementación de una estación de caudal que simula de una manera compacta procesos grandes presentes en la mayoría de las industrias, el sistema tiene como objetivo controlar el flujo de agua que circula por la tubería, por medio de un PLC el cual recibe la señal del transmisor magnético de flujo ROSEMOUNT 8732E, dicha información es procesada de acuerdo a las estrategias de control previamente ya programadas.

El controlador envía una señal eléctrica hacia un variador de frecuencia, el mismo que se encarga de alterar la velocidad de la bomba centrífuga, consiguiendo así modificar el flujo de líquido que atraviesa por la tubería, la variación será observada tanto en el transmisor como

en el rotámetro. Además el sistema consta de un HMI desarrollado en la TOUCH KTP 600 el cual permite monitorear variables importantes del proceso e ingresa valores de SP y constantes de sintonización.

Este trabajo comprende de VI secciones incluida la Introducción: en la Sección II se presenta el modo de control, en la Sección III se describe el diseño y construcción de la planta de caudal; en la Sección IV se presenta resultados y pruebas experimentales; por último en la Sección V se presentan las conclusiones.

II. MODO DE CONTROL

En la Fig. 1 se describe el bucle cerrado de control donde cada etapa cumple con sus funciones específicas: *i) Controlador* encargado de recibir la referencia y el valor de la variable de proceso para calcular el error y ejecutar las estrategias de control, *ii) Proceso Controlado* donde se describe el sistema en su totalidad con su variable manipulada y controlada; *iii) Elemento de medición* el dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas y transformarlas en variables eléctricas, la ventaja del sistema retroalimentado es su respuesta relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas del sistema [5].



Figura 1: Control retroalimentado.

A. Control Proporcional (P)

Este tipo de control genera una señal proporcional al error Fig. 2, en este sistema existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control, donde su acción está representada por:

$$u(t) = Kp * e(t) \quad (1)$$

donde: $u(t)$ salida del controlador; Kp ganancia del control proporcional y $e(t)$ error.

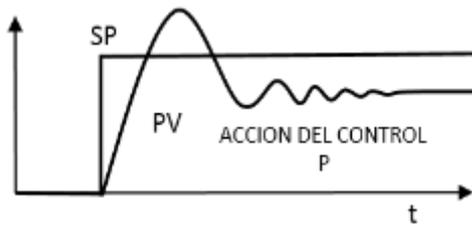


Figura 2: Respuesta del control proporcional (P)

B. Control Proporcional Integral (PI)

Esta acción se caracteriza por eliminar el error en estado estacionario ante a perturbaciones de carga Fig. 3. Por lo tanto la respuesta de un regulador PI será la suma de las respuestas debidas a un control proporcional P, que será instantánea al cambio de consigan o frente a una perturbación, y la acción del integral I, que será el encargado de anular totalmente la señal de error. La acción del controlador se define:

$$u(t) = Kp * e(t) + \frac{kp}{Ti} * \int_0^t e(t) * dt \quad (2)$$

donde: $u(t)$ respuesta del controlador; Kp ganancia del control proporcional, Ti tiempo integral y $e(t)$ error.

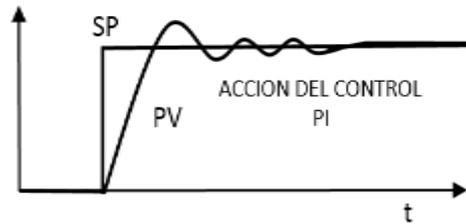


Figura 3: Respuesta del control proporcional integral (PI)

C. Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

La respuesta del control PID, es la combinación que resulta de la suma de las acciones proporcional, integral y derivativa. La ecuación perteneciente el Control Proporcional Integral Derivativo viene dada por:

$$u(t) = Kp * e(t) + \frac{kp}{Ti} \int_0^t e(t) * dt + Kp * Td \frac{d e(t)}{dt} \quad (3)$$

donde Kp ganancia proporcional, Ti tiempo integral, Td tiempo derivativo y $e(t)$ es el error.

Este control elimina el error en estado estable Fig. 4, agregado una buena estabilidad del sistema y a una buena velocidad. Si la velocidad es relativamente alta el sistema presentara un sobre impulso [6].

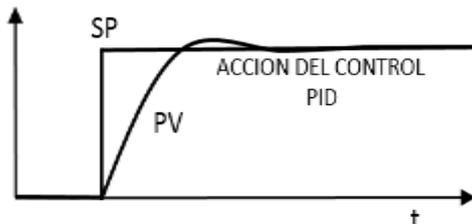


Figura 4: Respuesta del control proporcional integral derivativo (PID)

III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se describe el diseño y construcción de la estación para el control automático de la variable caudal, por medio i) *PLC S7-1500* encargado del control ii) *TOUCH PANEL KTP600* contiene el HMI de la estación iii) *ROSEMOUNT 8732E* realiza la medición de la variable caudal iv) *Planta* posee un tanque reservorio que contiene el líquido que circula por la tubería además se instala 3 válvulas manuales para el mantenimiento de la estación y simulación de perturbaciones, el actuador será capaz de variar la frecuencia que entrega a una bomba centrífuga de 1/2 Hp trifásica de corriente alterna con el objetivo de modificar el caudal. La Fig. 5 representa el diagrama de bloques de la estación.

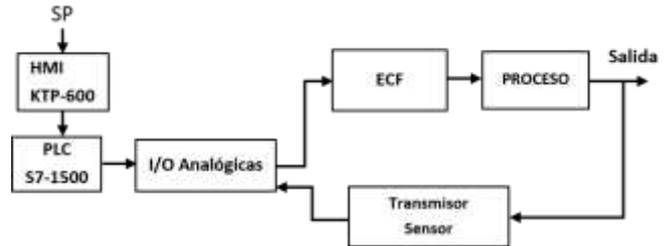


Figura 5: Diagrama de bloques del proceso

A. Puesta en servicio del transmisor

El transmisor magnético de flujo 8732E viene con un sistema de brida de 1/2 pulgada haciendo necesario su instalación según la norma SME / ANSI B16.21. Para la medición de caudal que atraviesa por el transmisor, se debe cumplir distancias mínimas tanto aguas arriba como aguas abajo siendo así: cinco diámetros de tubería recta aguas arriba y dos diámetros de tubería recta aguas abajo. Quiere decir al utilizar una tubería de 3/4 de pulgada realizar los cálculos respectivos [7].

Aguas arriba: $\frac{3}{4} * 5 = 3,75$ pulgadas = 9,52 cm

Aguas abajo: $\frac{3}{4} * 2 = 1,5$ pulgadas = 3,81 cm



Figura 6: Instalación del transmisor 8732 E en la tubería.

B. Diagrama del panel frontal

La Fig.7 muestra el diagrama del panel frontal de la estación de caudal con sus correspondientes elementos e indicadores para realizar las conexiones respectivas.

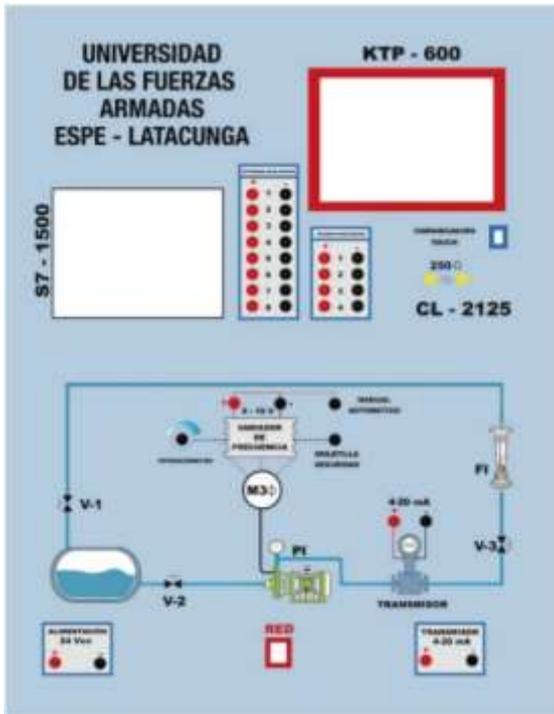


Figura 7: Diagrama del panel frontal.

C. Diagrama P&ID del proceso de caudal

En procesos industriales es necesario el diagrama P&ID, por que representan de manera técnica y sencilla el proceso de caudal en su totalidad, Fig. 8.

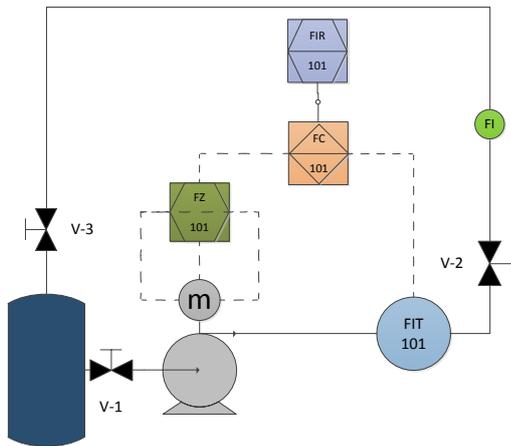


Figura 8: Diagrama P&ID del proceso de caudal

D. Diagrama de flujo del proceso caudal

La Fig. 9 representa el diagrama de flujo de la estación de caudal con cada elemento presente en el sistema.



Figura 9: Diagrama de flujo del proceso

E. Software TIA PORTAL (Totally Integrated Automation)

El Totally Integrated Automation Portal proporciona el entorno de trabajo para la programación de PLC SIEMENS y TOUCH PANEL, siendo una herramienta de ingeniería que combina el SIMATIC STEP 7, SIMATIC WinCC y SINAMICS StartDrive dando como resultado una mayor eficiencia para desarrollar proyectos de Automatización.

Siendo un software con interfaz intuitiva para el usuario, completa transparencia de datos, el software facilita la etapa de diseño, puesta en marcha, operación, mantenimiento y hasta la actualización de soluciones de automatización [8].



Figura 10: Menú del HMI de la estación de Caudal

El software TIA PORTAL permite configurar y programar el controlador PLC Siemens S7-1500 como la TOUCH Panel KTP 600. La aplicación permite realizar el HMI con diferentes usuarios que requiera el sistema u operador, en la estación de caudal se realizó la selección del menú que muestra la Fig. 10: i) *Tendencias* se presenta el comportamiento de variables del proceso en función del tiempo, ii) *Históricos* de las señales del proceso; iii) *Proceso y Control* permite configurar las constantes de los controles tradicionales e ingreso del valor de consigna.

IV. RESULTADOS Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

A. Descripción del sistema implementado

El sistema está constituido por varios dispositivos que permiten el correcto funcionamiento del proceso, además posee un controlador que regula automáticamente el caudal, los tipos de regulación que están implementados son Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID). La Fig. 11 muestra la ubicación de los dispositivos en el sistema de caudal, la estación cuenta con recirculación del caudal. Para realizar las pruebas del módulo se debe ejecutar el sistema con el respectivo usuario

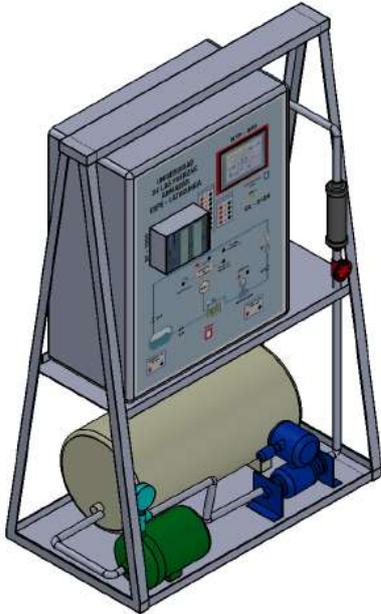


Figura 11: Estación de caudal

B. Pruebas experimentales de la estación de caudal

Se realiza la validación del funcionamiento de la estación en modo manual, variando la frecuencia de la bomba y observando el comportamiento de la variable caudal. Los datos obtenidos del transmisor se muestran en la Tabla 1 en un rango de 10 a 40 litros por minuto (LPM) y comprobados con un elemento de vidrio (Rotámetro).

Tabla 1. Datos medidos del caudal en LPM

TRANSMISOR [LPM]	ROTÁMETRO [LPM]	ERROR [%]
10,12	10	1,2
13,03	13	0,23
22,04	22	0,18
33,09	33	0,27
40,02	40	0,05
33,07	33	0,21
22,02	22	0,09
13,05	13	0,38
10,09	10	0,9
ERROR PROMEDIO		0,25

C. Control automático PID

Para seleccionar el control PID es necesario ingresar al proceso como "ADMINISTRADOR", por los privilegios que se le otorga al usuario, dentro de esta opción se puede realizar: *i) Set Point* variable, ingresado por el operador según su necesidad *ii) Tipo de control* a utilizar en el sistema *iii) Ejecución* de las estrategias de control y por ultimo *iv) Valores* de las constantes de sintonía del PID. Fig.12.

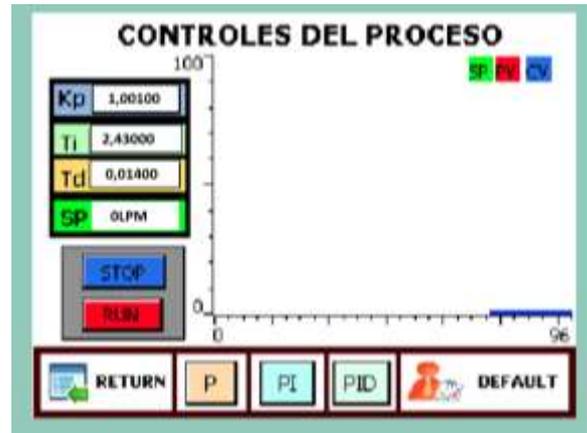


Figura 12: Ejecución del control automático (PID)

D. Tendencias de control automático PID

Para observar las tendencias del proceso se ingresa desde el menú del HMI, en esta sección se analiza la curva de respuesta que se tiene con los controles tradicionales, se ingresa una consigna (SP) dentro del rango establecido del proceso de 10 a 40 (LPM). En la Fig. 13, indica el comportamiento del control PID, y la reacción de la estrategia de control frente al cambio de consigna mostrando los valores de Set Point (SP) de color verde, Process Value (PV) color rojo y Control Value (CV) color azul



Figura 13: Respuesta del sistema frente a un cambio de SP de 15 LPM a 30 LPM y 20 LPM

Para simular perturbación en el sistema nos apoyamos de válvulas manuales previamente instaladas en la línea de la tubería, en la Fig. 14 se observa cómo reacciona el controlador ante este cambio inesperado, su respuesta es críticamente amortiguada y su variable de control es totalmente estable.

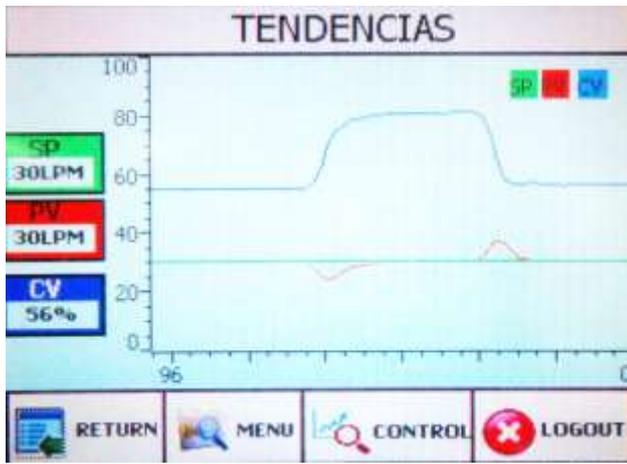


Figura 14: Curva de reacción del proceso frente a una perturbación.

V. CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado una estación de caudal para el control y monitoreo automático del proceso caudal, con la disposición del usuario "ADMINISTRADOR" seleccionar el tipo de control y las constantes de sintonía.

El desarrollo de la estación complementa la formación de los futuros profesionales, permitiendo realizar y familiarizarse con el control y automatización industrial mediante la aplicación de prácticas que simulan estos procesos

El software TIA PORTAL permite la configuración, administración y programación del PLC S7-1500 y la TOUCH PANEL KTP600, bajo la misma plataforma de programación brindando un entorno fácil e intuitivo con lo cual llega a ser un software con gran flexibilidad.

La interfaz humano maquina HMI cumple con las funciones de monitoreo, control y supervisión del proceso, proporcionando al usuario un entorno amigable puesto que a través del mismo se pueden realizar varias opciones como ingresar las constantes del control, variar el Set Point, observar gráficas de tendencias e históricos.

La instalación de la brida se realiza bajo estándares ASME/ANSI B16.5 y el estándar ASME/ANSI B16.47, para un buen funcionamiento del sistema.

El variador de frecuencia VARIADOR DELTA VFD004E23A actúa como elemento de control final, ya que con la señal de control enviada desde el PLC regula en forma proporcional el caudal, además éste protege el desgaste de la bomba y sus elementos internos.

La programación que se realizó del variador depende de las características de la bomba trifásica utilizada, la frecuencia máxima que se trabajo es de 50 Hz, ya que a esta frecuencia es suficiente para que recircule el caudal por la tubería y no sobrepase la medida del rotámetro.

VI. REFERENCIAS

- [1] J. Asedo Sanchez, D. Santos, "Instrumentación y control avanzado de procesos", Madrid, p. 603, 2013.
- [2] K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderno", Cuarta ed., Madrid: Pearson Educacion S.A. , p. 984, 2004.
- [3] M. Johnson, M. Moradi, "PID Control", Londres:Verlang, p. 539.4, 2005.
- [4] P. Ponce Cruz, "Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería", Mexico: AlfaOmega, 2010.
- [5] K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderna", Madrid: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [6] A. Sánchez, "Instrumentación y Control Avanzado de Procesos", España: Díaz de Santos, 2016.
- [7] ROSEMOUNT, "Guía de Instalación Rápida. Sistema de medidor de caudal magnético Rosemount 8732E", Dic., 2012. [En línea]. Available: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00825-0109-4663.pdf> [Último acceso: 15 Octubre 2015].
- [8] SIEMENS, "SIMATIC EN STEP 7 en el TIA PORTAL", Nov., 2012. [En línea]. Available: http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/es/brochure_simatic-step7_tia-portal_es.pdf [Último acceso: 17 Octubre 2015].



Carvajal Christian. Nació el 25 de Febrero de 1992 en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua-Ecuador. Cursó sus estudios en el Colegio Técnico "ATAHUALPA" donde obtuvo el título de Bachiller Técnico Industrial, especialización Electrónica de Consumo, y sus estudios superiores de Ingeniería en Electrónica E Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Latacunga.
E-mail: cpcarvajal@espe.edu.ec



Proaño Luis. Nació el 21 de Marzo de 1992 en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua-Ecuador. Cursó sus estudios en el Colegio Técnico "Guayaquil" donde obtuvo el título de Bachiller Técnico Industrial, especialización Electrónica de Consumo, y sus estudios superiores de Ingeniería en Electrónica E Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Latacunga.
E-mail: luis.e.proa@gmail.com