

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LOS SISTEMAS VELOCIDAD Y CAUDAL PARA EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA

Jiménez D. Pérez A.

Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga

Abstract— La automatización de procesos y las técnicas de control en la elaboración de productos es un problema creciente en diversas industrias, donde el control de las distintas variables dinámicas son temas fundamentales de desarrollo e innovación para garantizar calidad, productividad y competencia de los productos, es por ello que integrando los recursos humanos, tecnológicos y las competencias intelectuales se ha diseñado e implementado un módulo didáctico para el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE extensión Latacunga, que sirva como instrumento de aprendizaje para los estudiantes, los mismos que al realizar prácticas destinadas en sus asignaturas reforzaran el conocimiento teórico-práctico adquirido en el aula de clase.

Palabras claves— Módulo didáctico, HMI, PLC, TOUCH PANEL, Variador de frecuencia.

I. INTRODUCCIÓN

EL presente documento indica la implementación realizada en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE extensión Latacunga donde se diseñó e implementó un módulo didáctico que realiza el monitoreo y control automático de dos sistemas velocidad y caudal.

El sistema de caudal controla el flujo de agua que circula desde y hacia el tanque de almacenamiento por medio de un PLC el cual toma la señal de un transmisor de paletas, éste autómata procesa la información de acuerdo a un modo de control, para luego enviar una señal eléctrica hacia un variador de frecuencia, el mismo que variará la velocidad de la bomba centrífuga de forma proporcional, cambiando el flujo de agua que circula por la tubería, el cual es observado mediante un rotámetro y de esta manera establece el control requerido.

El sistema de velocidad controla las revoluciones por minuto o RPM que genera un motor eléctrico trifásico por medio de un PLC el

cual toma la salida en frecuencia de un encoder incremental, éste autómata con la ayuda de los contadores rápidos procesa la información de acuerdo a un modo de control, para luego enviar una señal eléctrica hacia un variador de frecuencia, el mismo que variará proporcionalmente la velocidad del motor cambiando las RPM y de esta manera realiza el control requerido.

Los sistemas de velocidad y caudal son capaces de trabajar al mismo tiempo ya que el autómata o PLC puede realizar hasta 32 lazos de control a la vez, además mediante una TOUCH PANEL se puede seleccionar la visualización de cada proceso y monitorear dichos sistemas.

II. MODOS DE CONTROL

A. Introducción

Un bucle de control por retroalimentación se compone de un proceso, el sistema de medición de la variable controlada, el sistema de control y el elemento final de control. Cada uno de estos elementos tiene su propia dinámica, que vendrá descrita por una función de transferencia (1). Como se observa en la figura 1.

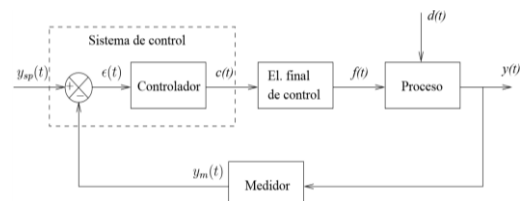


Figura 1: Diagrama de bloques de un lazo de control realimentado.

B. CONTROL PROPORCIONAL

El controlador proporcional (P) genera a la salida una señal de control que es proporcional a la señal de error, de tal manera que la acción proporcional es la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$. De este modo:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (1.1)$$

donde K_p es la ganancia proporcional.

Cuanto mayor es la ganancia del control proporcional, mayor es la señal de control generada para un mismo valor de señal de error. De este modo, se puede decir que el aumento de la ganancia del control proporcional permite reducir el error en estado estacionario. Este control reduce el tiempo de subida, incrementa el sobreimpulso y reduce el error.

El controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (2).

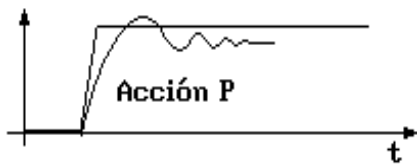


Figura 2: Forma de onda control proporcional.

C. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL

La acción de control proporcional integral (PI) genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción integral conjuntamente, por lo que al agregar la acción integral a la proporcional se elimina el error estacionario. Industrialmente se utiliza solamente el control (PI) y no el control Integral puro. La acción de control Proporcional Integral se define como:

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) * dt \quad (1.2)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral.

El tiempo integral T_i ajusta la acción del control, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. El control proporcional integral decremента el tiempo de subida, incrementa el sobreimpulso, y el tiempo de estabilización, y tiene el efecto de eliminar el error estacionario pero empeorará la respuesta transitoria.

Este tipo de control puede ser empleado en sistemas que tienen grandes cambios, pero estos a su vez, deben ser lentos para evitar

sobreimpulsos producidos por el tiempo integral. Una desventaja es que durante el arranque de los procesos, la acción integral causa considerables impulsos del error antes de alcanzar el punto de operación (3).



Figura 3: Forma de onda control proporcional integral.

D. CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO.

La acción de control proporcional derivativo (PD) genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción derivativa conjuntamente, por lo que al agregar la acción derivativa a la proporcional se reduce el sobreimpulso y el tiempo de estabilización, por lo cual se tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando la respuesta del proceso.

La acción de control derivativa nunca se la utiliza sola, debido a que únicamente es eficaz durante períodos transitorios, ésta acción de control, llamada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. La acción de control Proporcional Derivativa se define como:

$$u(t) = K_p * e(t) + k_p * T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (1.3)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_d se denomina tiempo derivativo.

El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. La acción de control derivativa tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control derivativa nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido. Aunque ésta acción de control tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador, tomando en cuenta que tampoco elimina el error en estado estacionario (3).

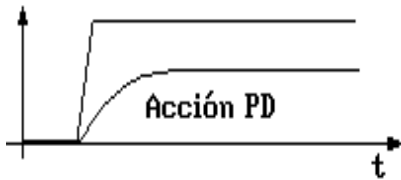


Figura 4: Forma de onda control proporcional derivativo.

E. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID

La acción de control proporcional integral derivativa (PID) genera una señal resultado de la combinación de la acción proporcional, la acción integral y la derivativa conjuntamente.

La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.4)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo.

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. La mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con mejores tiempos de adquisición y un valor de sobreimpulso pequeño (4).



Figura 5: Forma de onda control proporcional integral derivativo.

III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un módulo didáctico que realice el monitoreo y control automático de dos sistemas velocidad y caudal realizando la programación del PLC S7-1200 y la TOUCH PANEL KTP600 bajo un mismo software TIA PORTAL (Totally Integrated Automation).

La implementación del módulo didáctico requerirá de la instalación, conexión y configuración de dispositivos de control, además de la instrumentación y visualización de los procesos, con la finalidad de integrar dos sistemas en lazo cerrado que sean capaces de controlar de manera autónoma cada uno de los procesos de caudal y velocidad respectivamente.

A. Diagrama del panel frontal

A continuación se muestra el diagrama que va adherido en el panel frontal del módulo didáctico, en el cual podemos realizar las conexiones necesarias para el funcionamiento de los procesos de caudal y velocidad.

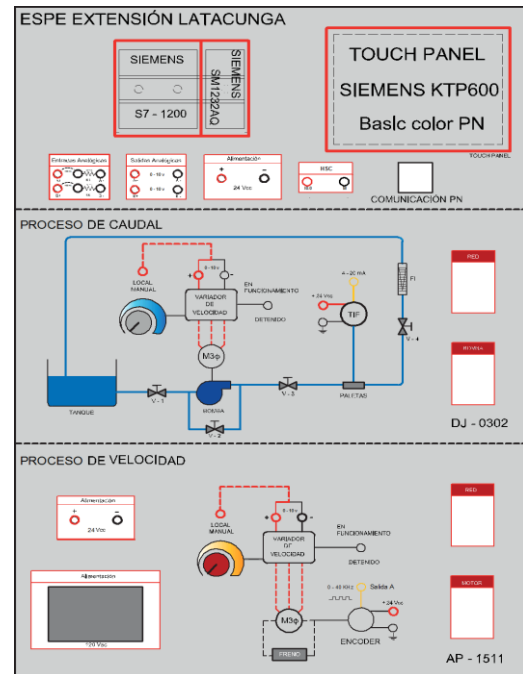


Figura 6: Diagrama del panel frontal.

B. Diagrama de bloques

A continuación se muestra los sistemas de control de caudal de agua y velocidad de un motor con funcionamiento en lazo cerrado de cada proceso.

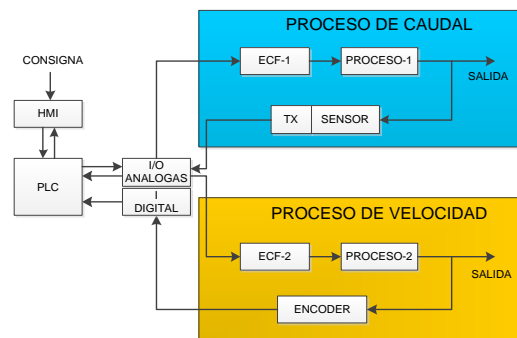


Figura 7: Diagrama de bloques de los sistemas caudal y velocidad.

C. Diagrama P&ID del proceso de caudal

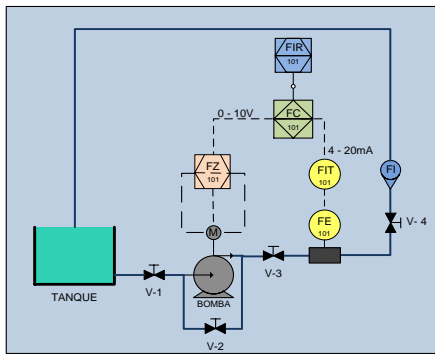


Figura 8: Diagrama P&ID del proceso de caudal.

D. Diagrama P&ID del proceso de velocidad

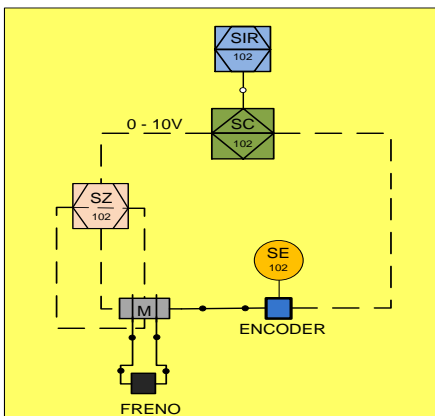


Figura 9: Diagrama P&ID del proceso de velocidad.

E. Diagrama de flujo del proceso caudal

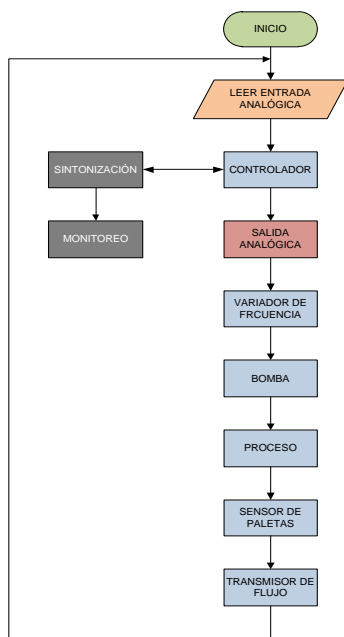


Figura 10: Diagrama de flujo del proceso de caudal.

F. Diagrama de flujo del proceso de velocidad

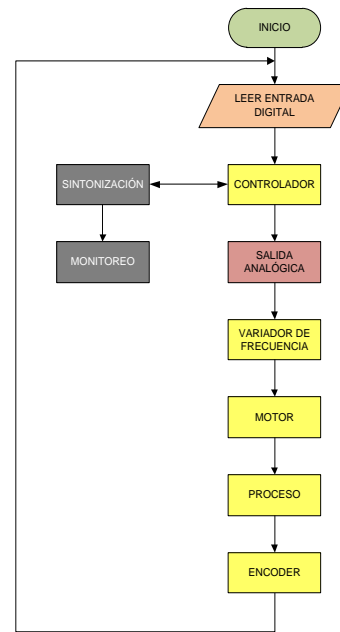


Figura 11: Diagrama de flujo del proceso de velocidad.

G. Software TIA PORTAL (Totally Integrated Automation)

TIA portal es un innovador sistema de ingeniería para todas las tareas de automatización el cual es intuitivo, eficiente y permite diseñar una gran gama de procesos de forma óptima desde una sola pantalla de ordenador. Sus módulos permiten la programación de controladores y la visualización de proyectos. La Industria de automatización de Siemens ha integrado la ingeniería de aplicaciones seguras dentro del entorno de trabajo.

TIA Portal bajo la interfaz de usuario de Step7 V11 "La nueva herramienta de ingeniería avanzada de Step7 que ahora provee las herramientas requeridas de configuración y programación para la creación de un programa con mayor seguridades (5).

H. Programación del PLC S7-1200 y la TOUCH PANEL KTP 600

El software TIA PORTAL (Totally Integrated Automation), es la herramienta con la que se va a configurar, administrar y programar el PLC S7-1200 y la TOUCH PANEL (KTP600 Basic Color PN) con la que se va a realizar el HMI de cada proceso. Todo bajo un mismo entorno de forma rápida y sencilla.

IV. RESULTADOS Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

A. Descripción física del sistema

Los procesos tanto de caudal como de velocidad están formados de varios materiales, dispositivos e instrumentos para llevar a cabo las funciones de control de cada uno de ellos, a continuación se observa el módulo didáctico ya implementado y listo para ponerlo en funcionamiento.



Figura 12: Módulo didáctico de los procesos caudal y velocidad.

B. Pruebas experimentales

Una vez que se disponga del módulo didáctico ya ensamblado, interconectado, configurado y programado de manera correcta, se procede necesaria e indispensable a realizar las pruebas respectivas a los procesos tanto de caudal como de velocidad por secciones y en completo funcionamiento de cada uno de ellos.

Dentro de las pruebas del proceso de caudal se debe comprobar la adquisición de la señal del transmisor de flujo, que está configurado para trabajar en un rango de 1 a 10 galones por minutos (GPM) y entregar una corriente de 4 a 20 mA en forma proporcional, además se debe visualizar los datos en la TOUCH PANEL, así como las señales que adquiere y emite el PLC hacia los dispositivos asociados.

Dentro de las pruebas del proceso de velocidad se debe comprobar la señal emitida por el encoder incremental, la cual genera una frecuencia comprendida de 0 a 40 KHz de forma proporcional a las revoluciones por minuto (RPM) generadas por el motor asíncrono trifásico, además se debe visualizar los datos en la TOUCH PANEL, así como las señales que adquiere y emite el PLC hacia los dispositivos asociados.

C. Funcionamiento del control PID

Se debe iniciar el usuario "ADMINISTRADOR" y la contraseña "control" ya que éste es el único que tiene todos los privilegios para realizar las distintas configuraciones y cambios de los procesos.

Para configurar este tipo de control se debe ingresar oprimiendo el botón de control proporcional integral derivativo (PID), entonces se mostrarán activas las constantes de ganancia proporcional K_p , tiempo integral T_i y tiempo derivativo T_d como parámetros configurables.

D. Análisis de las curvas del control PID

Para visualizar las curvas de respuesta de cada proceso, primero se debe seleccionar el proceso a controlar, para luego ingresar a menú y oprimir el botón TENDENCIAS, entonces se despliega una pantalla en la cual se puede observar el PV, CV y SP, con la facilidad de modificar el valor de la consigna.

• Proceso de caudal:

Para analizar la respuesta del proceso de caudal con control proporcional integral derivativo PID, se debe ingresar el valor de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d en la pantalla de TIPOS DE CONTROL seleccionando el botón (PID).

La figura 13 muestra la curva de respuesta del control proporcional integral derivativo, en la cual se observa un tiempo de estabilización de 8 segundos hasta que la variable de proceso llegue al punto de consigna y permanece constante.

Al aplicar una perturbación a este tipo de control, se observa en la curva de respuesta que el proceso corrige de forma rápida la perturbación generando una mínima oscilación y eliminando el error en estado estacionario, ya que posee las mejores características de los tres controladores a la vez. Como se observa en la figura 14.

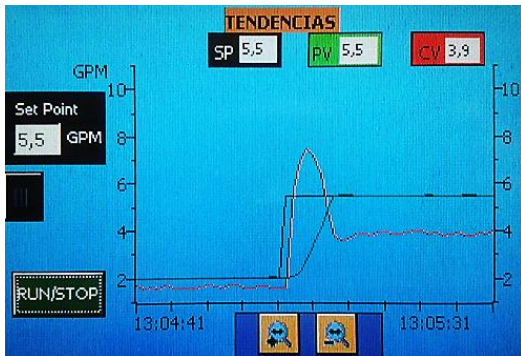


Figura 13: Curva de respuesta del control proporcional integral derivativo con $K_p=2,4$, $T_i=4,5$ y $T_d=0,3$.

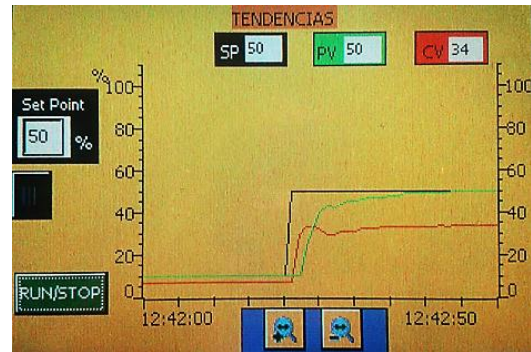


Figura 15: Curva de respuesta del control proporcional integral derivativo con $K_p=0,5$, $T_i=3,0$ y $T_d=0,5$.

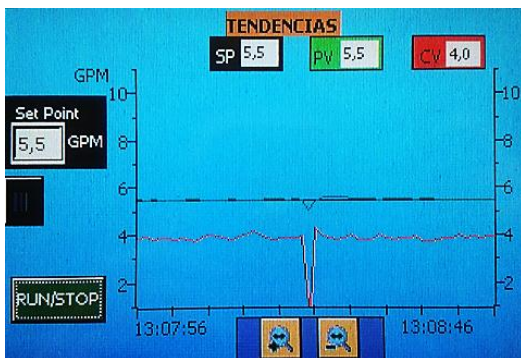


Figura 14: Curva de respuesta del control proporcional integral derivativo ante una perturbación del proceso caudal.

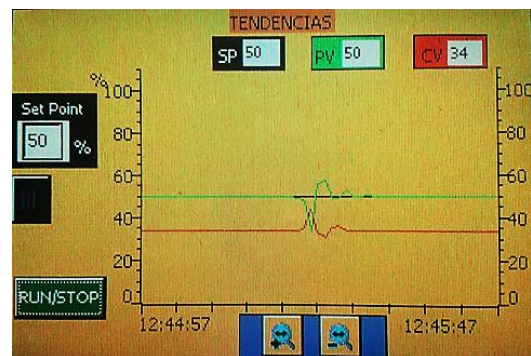


Figura 16: Curva de respuesta del control proporcional integral derivativo ante una perturbación del proceso velocidad.

- Proceso de Velocidad

Para analizar la respuesta del proceso de velocidad con control proporcional integral derivativo PID, se debe ingresar el valor de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d en la pantalla de TIPOS DE CONTROL seleccionando el botón (PID).

La figura 15 muestra la curva de respuesta del control proporcional integral derivativo, en la cual se observa un tiempo de estabilización de 24 segundos hasta que la variable de proceso llegue al punto de consigna y permanece constante.

Al aplicar una perturbación a este tipo de control, se observa en la curva de respuesta que el proceso corrige de forma rápida la perturbación generando una mínima oscilación y eliminando el error en estado estacionario, ya que posee las mejores características de los tres controladores a la vez. Como se observa en la figura 16.

V. CONCLUSIONES

- Se ha diseñado e implementado un módulo didáctico que realiza el monitoreo y control automático de dos procesos caudal y velocidad, utilizando los conocimientos adquiridos durante la formación académica como profesionales de la carrera, permitiendo tener una visión general de la estructura y de las etapas que intervienen en cada proceso industrial.
- La herramienta de software TIA (Totally Integrated Automation) Portal permitió realizar la configuración, administración y programación del PLC S7-1200 y la TOUCH PANEL KTP600, bajo un mismo entorno fácil y de una manera intuitiva con lo cual se pudo comprobar la flexibilidad del mismo.
- El PLC S7-1200 CPU-1212C permitió realizar eficazmente los distintos modos de control de los dos procesos caudal y velocidad, ya que en este controlador se puede configurar y manipular hasta 32 lazos de control en forma secuencial,

además el controlador permite realizar un modo de control específico con solo anular las acciones reguladoras de determinados términos en su algoritmo de control.

- Al comparar las gráficas de tendencias de los dos procesos se observó que el tiempo de estabilización del proceso de caudal es menor que el de velocidad, pudiendo concluir con esto que el proceso de caudal es el más rápido.
- El variador de frecuencia MICROMASTER 440 actúa como elemento de control final en ambos procesos, ya que refleja la señal de control enviada desde el PLC en forma proporcional al mismo, además éste permite reducir el desgaste de los actuadores del proceso de caudal y velocidad.
- Se comprobó que el proceso de caudal funciona correctamente con un control Proporcional-Integral (PI), debido que se trata de un proceso rápido se requiere de una pequeña ganancia proporcional y de un tiempo integral (T_i) mayor, pues presenta un error en estado estacionario considerable, este proceso no necesita un tiempo derivativo (T_d) alto, ya que éste puede ser obviado si el proceso no está expuesto constantemente a perturbaciones.
- El acople realizado entre el eje del motor asíncrono trifásico y el encoder incremental refleja la estabilidad de estos dispositivos, de tal manera que al funcionar el motor en su velocidad nominal, los datos adquiridos por el encoder no presentan una desviación significativa en la medición de la frecuencia.
- Se pudo comprobar que el proceso de velocidad funciona correctamente con un control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), ya que al tratarse de un proceso rápido se requiere de una mínima ganancia proporcional y de un tiempo integral (T_i) mayor, pues presenta un error en estado estacionario considerable, este proceso tiene además un tiempo derivativo (T_d) mínimo, con el fin de evitar cambios bruscos de la variable de proceso reduciendo oscilaciones y disminuyendo el tiempo de estabilización.

REFERENCIAS

[1] ARÁNTEGUI, J. (2010). Universitat de Lleida. Obtenido de:
http://web.udl.es/usuaris/w3511782/Control_de_procesos/Unidades_files/apuntes_10-11.pdf.

[2] GATA, K. (1978). Ingeniería de Control Moderna. Madrid, España: Prentice Hall.

[3] UDLAP. (2008). Universidad de las Américas Puebla. Obtenido de:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documento/s/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf

[4] DISA. (2010). Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Obtenido de:
http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/ftp/material_a_signaturas/Ing_Sistemas_I/Transparencias%20de%20Clase/Tema%2006%20-%20Acciones%20B%20E1sicas%20de%20Control.pdf

[5] IDENTI. (2012). TUS DESCARGAS SIN LIMITES. Obtenido de:
<http://www.identi.li/index.php?topic=104089#sthash.XkZkvkrg.dpuf>

Jiménez Diego. Nació en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado del Instituto Tecnológico Industrial "Ramón Barba Naranjo", Latacunga – Ecuador donde obtuvo el título de Bachiller Técnico Industrial, especialización Electrónica de Consumo.

Actualmente se encuentra finalizando sus estudios de Ingeniería en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador. E-mail: djimenez@espe.edu.ec

Pérez José. Nació en Ambato provincia de Tungurahua en Ecuador. Es graduado del Instituto Tecnológico Superior "Bolívar", Ambato – Ecuador donde obtuvo el título de Bachiller en ciencias, especialización Físico- matemático.

Actualmente se encuentra finalizando sus estudios de Ingeniería en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador. E-mail: japerez9@espe.edu.ec