

## Sistema de supervisión y control para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas<sup>δ</sup> *Supervision and Control System for the Centrifuge Pump Test Bank*

Edward Armando Rincón Esteban \*  
Myriam Jhoanna Calvo Becerra\*\*  
José Ricardo Bermúdez Santaella \*\*\*  
Juan José García Pabón\*\*\*\*



Tipo de artículo: resultado de investigación

Recibido: 31 de marzo de 2016  
Aceptado: 15 de mayo de 2016

### Resumen

Las bombas centrífugas son máquinas que absorben energía mecánica y a su vez devuelven al fluido energía hidráulica, esta energía se ve representada en el caudal y la altura suministrada por la bomba; cuando se requiere un caudal específico en algún sector industrial ya sea farmacéutico, alimenticio, entre otros, se hace necesario aplicar un controlador que se encargue de mantener la variable de interés en el punto deseado. Por lo tanto, en este estudio en particular se utilizó la herramienta IDENT<sup>‡</sup> ofrecida por el software Matlab<sup>®</sup> para realizar el modelo aproximado de la planta utilizando el método de identificación, seguidamente y con la ayuda del toolbox PID TUNNING se diseñó el controlador PID, que permitió corregir errores de estabilidad, disminuir las oscilaciones y mantener el caudal en la referencia establecida, respondiendo de manera adecuada a posibles perturbaciones presentes en el banco de pruebas, por último la implementación del controlador y la interfaz para el monitoreo se realizó en el software Labview<sup>®</sup>, empleando la DAQ 6009 para la adquisición y envío de los datos, en el análisis de los resultados se observó que el sistema mejora considerablemente al modificar los tiempos de activación de las bobinas del motor paso a paso.

**Palabras clave:** Bombas centrífugas; controlador PID; DAQ 6009; IDENT; Matlab<sup>®</sup>; Labview<sup>®</sup>

### Abstract

Centrifuges pumps are machines that absorb mechanical energy and in turn returned to the fluid hydraulic energy, this energy is represented in the flow and the head supplied by the pump; when a specific flow requirements in any industrial sector either pharmaceutical, food among others, it is necessary to apply a driver that is responsible for maintaining the variable of interest at the desired point. Therefore IDENT Matlab<sup>®</sup> tool offered by the software to perform the approximate plant model using the identification method, was used in this particular study and then with the help of PID TUNNING toolbox that allowed the PID controller was designed will correct errors stability, reduce oscillations and maintain the flow in the reference responding adequately to possible disturbances present in the test, finally implementing the controller and interface for monitoring it was conducted in the Labview<sup>®</sup> software using the DAQ 6009 for the acquisition and the data sent, in the analysis of the results it shows that the system is considerably improved by modifying the activation times of the coils of the stepper motor.

**Keywords:** centrifuges pumps; controller PID; DAQ 6009; IDENT; Matlab<sup>®</sup>; Labview<sup>®</sup>

<sup>δ</sup> Este artículo es resultado del proyecto Sistema de Supervisión y Control para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, perteneciente a la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta, Colombia en convenio con la Universidad Federal de Minas Gerais Brasil.

\* C.I. Ingeniería Electromecánica. Estudiante. Universidad Francisco de Paula Santander.  
Correo electrónico: edwardarmandore@ufps.edu.co

\*\* Ingeniera Electromecánica. Coinvestigadora. Universidad Francisco de Paula Santander.  
Correo electrónico: myriamjhoannacb@ufps.edu.co

\*\*\* MSc. Automatización e Instrumentación. Docente. Universidad Francisco de Paula Santander.  
Correo electrónico: josericardobs@ufps.edu.co

\*\*\*\* MSc. Ingeniería Mecánica. Coinvestigador. Universidad Federal de Minas Gerais. Correo electrónico: jjgp.ufmg@gmail.com

‡ System Identification Toolbox™ (IDENT). Es una aplicación para la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada y salida.

## Introducción

El control automático ha desempeñado un papel importante en el avance de la ingeniería y la ciencia, debido a que se ha convertido en una parte fundamental e integral de los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control ya sea de temperatura, presión, humedad, flujo, etcétera. (Ogata, 2010). Este control debe ir acompañado de un sistema de supervisión que permita visualizar en tiempo real el comportamiento y la dinámica de las variables de interés.

Según López (2015) La automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano. En los últimos años, se ha venido desarrollando el sistema denominado SCADA (siglas en inglés de *Supervisory Control And Data Acquisition*), por medio del cual se pueden supervisar y controlar las distintas variables que se presentan en un proceso o planta. Para ello se deben utilizar diversos periféricos, software de aplicación, unidades remotas, sistemas de comunicación, etcétera, que le permiten al operador tener acceso completo al proceso mediante su visualización en una pantalla de computador.

Bailey y Wright (2003) Mencionan que un SCADA abarca la recolección de la información y la transferencia de datos al sitio central, llevando a cabo el análisis y el control necesario, para luego mostrar la información sobre una serie de pantallas de operador y de esta manera permitir la interacción, cuando las acciones de control requeridas se transportan de nuevo al proceso. Según Gómez *et al.*, (2008), en su función de sistemas de control, los SCADA ofrecen una nueva característica de automatización que realmente pocos sistemas tienen: la de supervisión.

Como idea principal del estudio se tiene el desarrollo de un sistema de supervisión y control que permita corregir los errores de estabilidad y las oscilaciones que se presentan en el banco de pruebas

para bombas centrífugas. Además de mantener el caudal en un valor de referencia establecido, con el fin de generar futuras investigaciones orientadas a la detección de fallas.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe la metodología que se utilizó para desarrollar el sistema de supervisión y control, la Sección 3 muestra los resultados y discusiones que se presentaron durante la investigación y finalmente, las conclusiones se mencionan en la Sección 5.

## Metodología

El banco consta de una bomba centrífuga de 0.25HP de la empresa Barnes, un placa orificio y cuatro transmisores de presión absoluta, de los cuales dos son utilizados para determinar el caudal que circula por el equipo. Además posee un motor paso a paso que se utiliza para regular el flujo de caudal (válvula de control), como se puede apreciar en la figura 1.



**Figura 1.** Banco de pruebas para bombas centrífugas

Fuente: elaboración propia (2016)

En primer lugar, se caracterizó la planta tomando como referencia el número de pasos y el caudal, controlando la activación de cada bobina del motor paso a paso y registrando la lectura del caudal suministrada por los sensores, utilizando como medidor patrón el rotámetro de la serie FA-410 de la empresa Blue-White Industries, Ltd.

Seguidamente se procede a introducir los datos obtenidos en la herramienta para identificación de sistemas IDENT.

El modelo con mayor afinidad se importa al toolbox PID Tuning, donde se generan las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  del controlador PID.

La implementación del controlador se realizó en el software Labview®, creando un instrumento virtual (VI) en el que se conectaron diferentes elementos para formar el diagrama de bloques que controla la activación del motor paso a paso. Teniendo en cuenta que el motor utiliza la secuencia de tipo *wave drive* lo que implica que se active una bobina a la vez, esto brinda un funcionamiento más suave, pero disminuye el torque y la retención del motor.

La etapa de adquisición se realiza con una tarjeta DAQ 6009 la cual se encarga de enviar los datos suministrados por el acondicionador al VI, donde se compara el caudal real con la referencia deseada. De acuerdo a esa diferencia de caudales la señal de error se transmite al bloque PID, el cual ya está configurado con las constantes del controlador obtenidas en Matlab®, la salida del controlador determina los pasos necesarios para alcanzar el punto de referencia establecido.

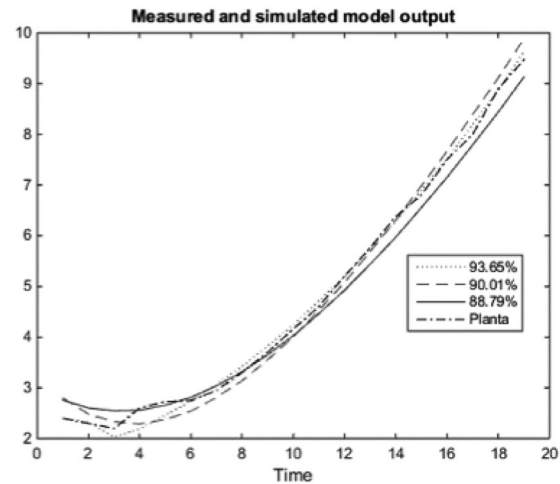
El motor paso a paso debe realizar cambios en el sentido del giro (horario-antihorario), por lo tanto el controlador suministra la información necesaria para identificar la dirección del mismo.

El número de pasos calculado se envía a las salidas digitales de la DAQ las cuales están conectadas a las bobinas del motor paso a paso, controlando el porcentaje de apertura de la válvula.

## Resultados y discusión

Los datos adquiridos durante la simulación se almacenan en un formato de archivo Text (LVM), el cual es configurado en Labview® utilizando el bloque de operación Write to Measurement y se importan a la plataforma de trabajo de Matlab®

asignándoles etiquetas a cada columna y creando un vector con la información registrada.

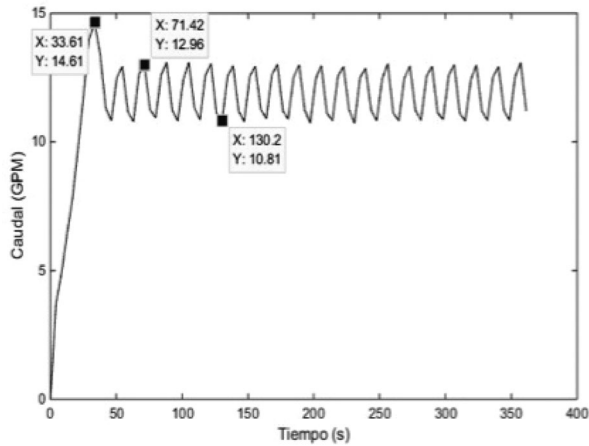


**Figura 2.** Porcentaje de Afinidad de los Modelos Aproximados de la Planta Real  
 Fuente: elaboración propia (2016)

Como se observa en la figura 2 el modelo que presenta una afinidad del 93,65% y el cual fue seleccionado para calcular las constantes del controlador PID ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ). En la fórmula (1) se presenta la función de transferencia que representa el modelo seleccionado.

$$G_p(s) = 0.01368 * \frac{(1 + 4.2019s)}{s(1 + 0.30544s)(1 + 0.32903s)} \quad (1)$$

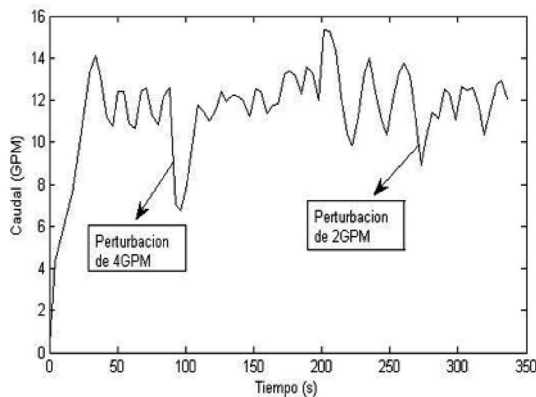
La figura 3 presenta el comportamiento dinámico de la planta al implementar un controlador ON-OFF, en el cual se pueden apreciar oscilaciones significativas en todo el régimen permanente (sistema inestable), a pesar de que su respuesta es rápida al establecer un caudal de referencia de 11 GPM.



**Figura 3.** Respuesta del Controlador ON-OFF sin Perturbaciones

Fuente: elaboración propia (2016)

En la figura 4 se puede apreciar la respuesta del controlador ON-OFF al aplicar dos perturbaciones una de 4GMP a los 100 segundos de iniciar el proceso y otra de 2GPM a los 270 segundos, notándose que el control no es el más adecuado debido a que se presentan oscilaciones significativas y no se logra la estabilidad del sistema.



**Figura 4.** Respuesta del Controlador ON-OFF con Perturbaciones

Fuente: elaboración propia (2016)

Las constantes del controlador PID se obtuvieron utilizando el toolbox PID Tunning de Matlab®, donde se puede observar el tiempo de establecimiento y el sobreimpulso que presentará el sistema, se pueden observar en la tabla 1 y 2.

Además es importante aclarar que según OGATA (2010) el porcentaje de sobreimpulso máximo permitido para la respuesta escalón está entre el 25% y 4%.

**Tabla 1.** Parámetros del Controlador PID

Controller Parameters	Tuned
$K_p$	64.4335
$K_i$	86.9162
$K_d$	3.2318

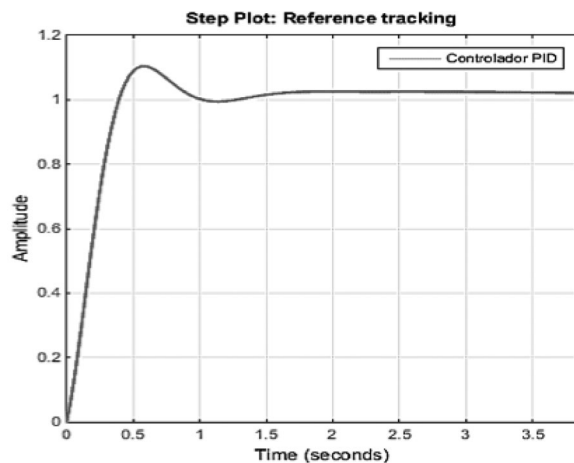
Fuente: elaboración propia (2016)

**Tabla 2.** Características del Controlador PID

Performance and Robustness	Tuned
Rise time	0.286 seconds
Settling time	4.12 seconds
Overshoot	10.5%
Peak	1.1
Gain margin	-Inf dB @ 0 rad/s
Phase margin	60 deg @ 5.19 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fuente: elaboración propia (2016)

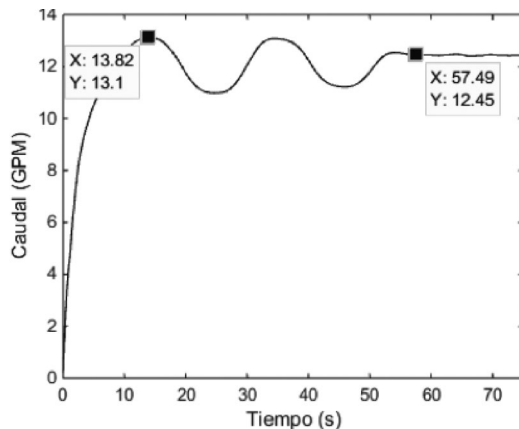
La simulación de la respuesta de la planta con el controlador PID al aplicar un escalón unitario se puede apreciar en la figura 5, la cual nos indica que el sistema responderá adecuadamente al caudal de referencia.



**Figura 5.** Simulación de la Respuesta del Controlador PID

Fuente: elaboración propia (2016)

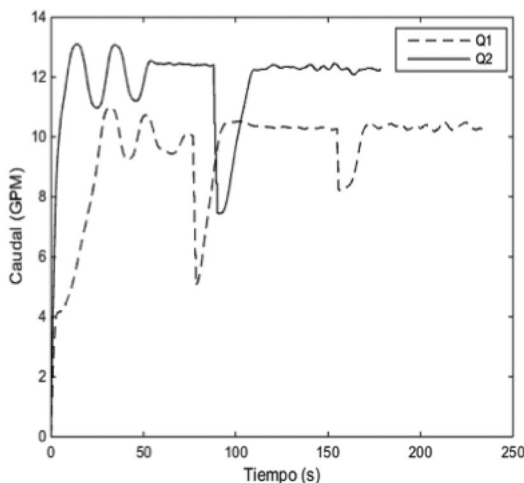
Al implementar el controlador PID con un caudal de referencia del 12,5 GPM, se observa que el comportamiento de la planta mejora con respecto al controlador ON-OFF, disminuyendo las oscilaciones en el régimen permanente, además presenta un caudal máximo de 13,82 GPM y un tiempo de establecimiento de 57,49 segundos como se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Respuesta del Controlador PID sin Perturbaciones

Fuente: elaboración propia (2016)

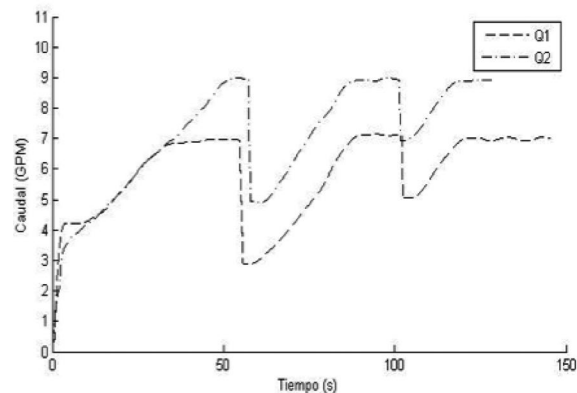
Al aplicar perturbaciones a diferentes caudales de referencia Q1 (10.3GPM) y Q2 (12.5GPM) se observó que el controlador respondió a los 33,3 segundos, presentando oscilaciones en el régimen transitorio y eliminando considerablemente las oscilaciones en el régimen permanente. Este comportamiento se puede apreciar en la figura 7.



**Figura 7.** Respuesta del Controlador PID con Perturbaciones

Fuente: elaboración propia (2016)

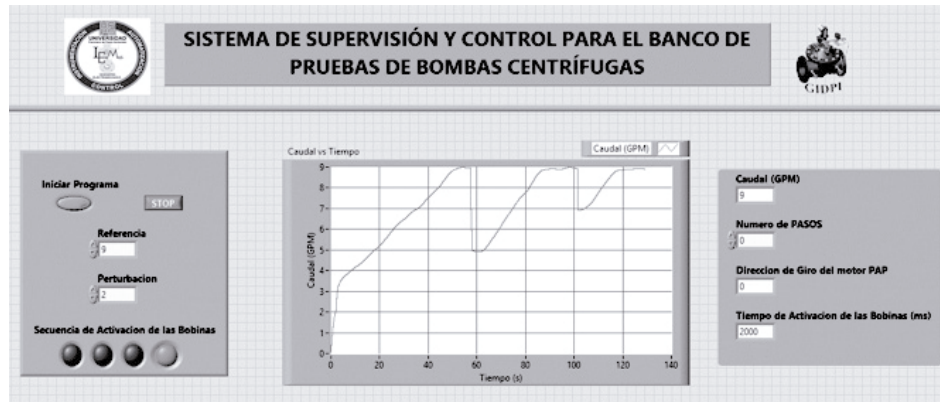
Mientras se realizaron las pruebas también se tuvo en cuenta la variación en el tiempo de activación de las bobinas del motor paso a paso y su respuesta se ve reflejada en la figura 8, donde el caudal Q1 y Q2 no presentan ningún tipo de oscilación tanto en el régimen transitorio como en el régimen permanente.



**Figura 8.** Respuesta del Controlador PID con Perturbaciones y Variación en el Tiempo de Activación de las Bobinas del Motor Paso a Paso

Fuente: elaboración propia (2016)

La interfaz gráfica se puede apreciar en la figura 9, la cual muestra el sistema de control con sus respectivos indicadores, donde se puede visualizar el caudal en tiempo real, el número de pasos, la dirección de giro y el tiempo de activación de las bobinas del motor paso a paso, además de ilustrar gráficamente el comportamiento dinámico del caudal.



**Figura 9.** Interfaz Grafica  
Fuente: elaboración propia (2016)

## Conclusiones

El caudal de salida es afectado directamente por la activación de las bobinas del motor paso a paso, por lo tanto cualquier mínima variación en el número de pasos se ve reflejada de manera inmediata en el valor del caudal.

Si bien es claro que el sistema mejoró considerablemente al aplicarle un controlador PID en lugar de utilizar el controlador ON-OFF con el que venía trabajando el banco de pruebas para bombas centrífugas la respuesta obtenida podría mejorar utilizando controladores más avanzados, ya sea un híbrido entre un controlador PID-FUZZY o recurriendo a controles inteligentes como redes neuronales.

La modificación del tiempo de activación de las bobinas, es una variable importante en la estabilidad del sistema y la disminución del error en régimen permanente. Por tal razón se hace necesario otro tipo de controlador capaz de modificar esta variable y obtener una mejor respuesta al combinar el efecto de dos controladores ejerciendo diferentes acciones de control sobre el sistema.

## Referencias

- Ugata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- López, E. (2015). Los sistemas SCADA en la automatización industrial. *Tecnología en Marcha*, 28(4), 3-14.
- Bailey, D. & Wright, E. (2003). *Practical SCADA for industry*. Newnes.
- Gómez, J., Reyes, R. & Guzman, D. (2008). *Temas especiales de instrumentación y control*. Cuba: Editorial Felix Varela.
- Ljung, L. (2007). *System Identification Toolbox for Use with MATLAB*.
- Model Identification from Data. (s.f). Introduction to System Identification Toolbox. Recuperado de <http://www.mathworks.com/videos/introduction-to-system-identification-toolbox-68901.html?type=shadow>
- Linear Model Identification. (s.f). Estimating Transfer Functions and Process Models. Recuperado de <http://www.mathworks.com/videos/estimating-transfer-functions-and-process-models-68899.html?type=shadow>

- MATLAB. (s.f). PID Controller Tuning in Simulink. Recuperado de <http://www.mathworks.com/help/slcontrol/examples/pid-controller-tuning-in-simulink.html?searchHighlight=PID>
- MATLAB. (s.f). Analyze Design in PID Tuner. Recuperado de <http://www.mathworks.com/help/control/getstart/analyze-design-in-pid-tuner.html?searchHighlight=PID%20Control%20Design%20with%20Control%20System%20Toolbox>
- MATLAB. (s.f). PID Control with Control System Toolbox. Recuperado de <http://www.mathworks.com/videos/pid-control-design-with-control-system-toolbox-68748.html>
- Cortés, C., Ramírez, V., & Buitrago, D. (2012). Identificación de Parámetros y Control Adaptativo Aplicado al Péndulo Invertido. *Revista Tecno Lógicas*, 28, 71-87.
- Penin, A. (2011). *Sistemas Scada*. Marcombo.
- Mikleš, J. & Fikar, M. (2007). *Process modelling, identification, and control*. Berlin: Springer.
- Suykens, J., & Vandewalle, J. (Eds.). (2012). *Non-linear Modeling: advanced black-box techniques*. Springer Science & Business Media.
- Shakya, R., Rajanwal, K., Patel, S. & Dinkar, S. (2014). Design and Simulation of PD, PID and Fuzzy Logic Controller for Industrial Application. *International Journal of Information and Computation Technology*.
- Calderón, A. (2010). *Desarrollo de un simulador de sistemas de control PID universales en Labview*.
- Bustinza, R. & Churayra, E. (2011). *Control de la velocidad en tiempo real de un motor DC controlado por lógica difusa tipo PD+ I usando Labview Real-Time DC motor velocity control by Fuzzy Logic Type PD+ I Controllers Using Labview*.
- Pineda Rosero, K. (2014). *Implementación de un Módulo de Entrenamiento para Control de Lazos Abiertos y Cerrados Utilizando Labview para el Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Mecánica*.(Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Kulkarni, P. & Kadu, C. (2015). PID based Dynamometer used in engine test.
- Khera, N., Balgavhar, S. & Shabarinath, B. (2011). Analysis Of PID Controller For Second Order System Using NI Labview.



*Heliangelus exortis* / Autor: Diego Alonso Rivera Vergara