



# Prototipo para control automático de nivel y caudal de líquidos

Joseph Vergara\*, Robinson Molina\*\*, César Machado\*\*.  
email: jvergara@ups.edu.ec

## Resumen

En este artículo se describe un prototipo que fue desarrollado para observar y controlar las variables de nivel y de flujo mediante una interfaz hombre-máquina (HMI). Se compone principalmente de una estructura diseñada para contener los elementos necesarios y del software de visualización y control. El objetivo del proyecto es encontrar lazos de control apropiados para el control efectivo de dos de las variables ampliamente utilizadas en la industria, nivel y flujo, con equipos que fácilmente pueden ser escalados hacia una operación industrial.

**Palabras claves:** automatización, control, flujo, nivel, PLC, HMI

## Abstract

*This paper presents a prototype that was developed to observe and control level and flow variables with a Human Machine Interface (HMI). It is mainly composed of a model that was designed to contain the needed items, and software for control and visualization. The objective of the project is finding appropriate control loops for the effective control of two variables that are widely used by industries, level and flow, with devices that could be easily scaled for industrial operation.*

**Keywords:** automation, control, flow, level, PLC, HMI

\* Ingeniero Eléctrico, Profesor de la Carrera de Ingeniería Mecánica -UPS- sede Quito

\*\* Estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica -UPS- sede Quito.

Recibido: 01-julio-2011; Aprobado: 5-octubre-2011

Forma sugerida para citar: Vergara, Joseph. (2011). "Prototipo para control automático de nivel y caudal de líquidos". *INGENIUS*. N° 6, (julio/diciembre). pp. 9-18 .ISSN: 1390-650X

## 1. Introducción

Automatizar un proceso tiene como finalidad volverlo constante, es decir, repetitivo sin el manejo del operador; para que logre esta función, el hombre únicamente interfiere en el proceso mediante un HMI (interfaz hombre-máquina), siempre y cuando sea necesario realizar algún cambio en cualquiera de las variables de proceso, de lo contrario el sistema SCADA<sup>1</sup> solamente recabará información sobre el desarrollo del proceso con esto se hará mucho más fácil la detección de fallas y su rápida solución.

El prototipo construido da la facilidad al estudiante de cambiar los valores de las variables de un proceso y obtener diferentes resultados de control con pequeñas variaciones de acuerdo al algoritmo de control cargado al PLC. La meta es conseguir la mayor exactitud posible en el control de nivel, caudal y volumen, sin

sacrificar excesivamente la velocidad que debe guardar el proceso.

## 2. Materiales y métodos

El estudio se fundamenta en el análisis de un prototipo autómatas que será implementado en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito, específicamente en el campus Kennedy, en la carrera de Ingeniería Mecánica. (Gráfico 1).

### 2.1 Dispositivos presentes en el prototipo

1. CPU Intel Core i3 540 a 3,07 Ghz, 3,17 GB RAM.
2. Monitor LG Flatron de 19 pulgadas.
3. Variador de frecuencia Sinamics G110 3/4 HP con panel de control BOP.
4. PLC Siemens S7200 CPU 224 DC/DC/DC con cable de conexión PPI/USB y módulo analógico Siemens EM 235.
5. Panel de luces de 24 V.
6. Tanque para ensayo o medición, diámetro interno 161 mm, altura de 1100 mm, capaci-

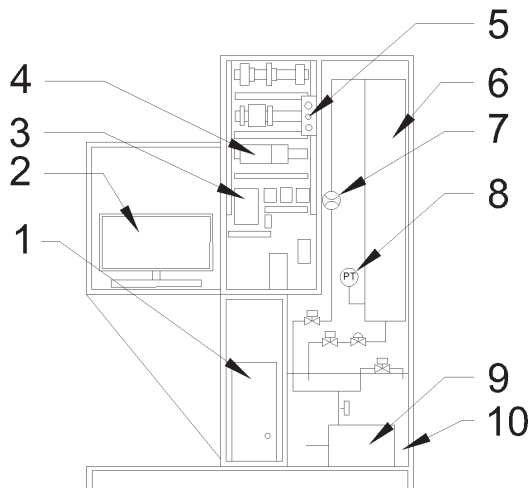
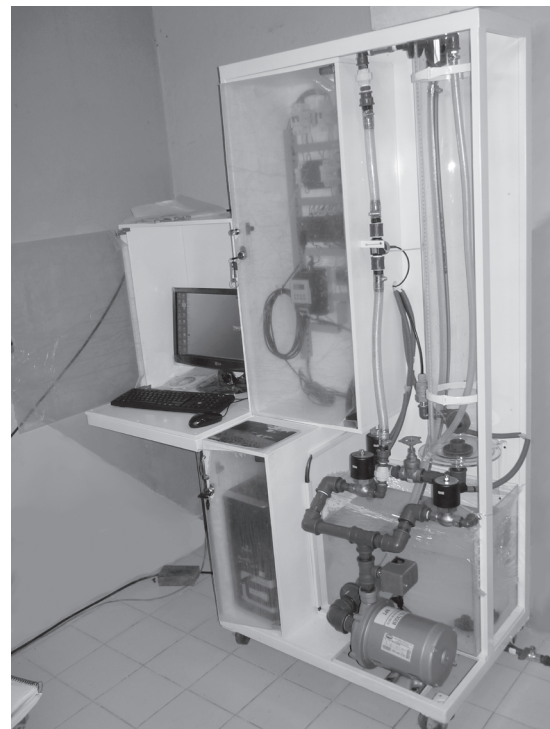


GRAFICO 1



<sup>1</sup> SCADA.



dad de 20 litros. 7. Transmisor de flujo marca Kobold, modelo DRS-0350..K0000. Rango de medición de dos a cuarenta litros por minuto. Rango de salida pulsos NPN de 0-320 Hz. 8. Transmisor de presión marca Endress+Hauser; modelo P MC131-A32F1D10. Rango de medición de 0 a 100 mbar. Rango de salida 4-20 mA. 9. Bomba centrífuga de 1/2HP THEBE TH16AL trifásica 220 V. 10. Tanque reservorio. Capacidad 50 litros.

Se usa el siguiente software: 1. Windows XP Profesional, versión 2002 Service pack 2; 2. STEP 7 MicroWin V4.0.5.08. 3. S7-200 PC Access 1.0.2.26. 4. Kepware Communications Server V5.4.135.0. 5. Wonderware Intouch versión 10.0.002 6. Microsoft Office Excel 2007 SP2.

Para la investigación se tomaron datos de pruebas realizadas mediante algoritmos de control programados en el PLC S7-200 de Siemens a través del software Microwin; se diseñaron tres tipos de algoritmos de acuerdo a las necesidades del proceso que permitieron obtener la información suficiente para realizar el análisis.

Los algoritmos de control que están descritos en la mayoría de los libros referentes a esta temática (Ogata, 2003), son control ON/OFF con histéresis, control proporcional y control PID. El control ON/OFF con histéresis permite simular una instalación básica para control de nivel de agua con flotadores o sensores ON/OFF, adquiriendo el estudiante conocimientos sobre temporizadores y lógica de contactos. El control proporcional se usa para variar la velocidad de un motor, en este caso el motor de la bomba; se hace necesario cuando un PLC no posee un control PID incluido, su principal defecto es que siempre tiene un error en la salida, es decir, no controla el proceso de un modo exacto. El control PID permite optimi-

zar el control sobre la velocidad de la bomba para lograr estabilizar al sistema con un error cercano a cero y, por ello se aconseja utilizarlo en todo tipo de sistemas de precisión. En el caso del prototipo se ha optado por realizar el programa con el lazo de control PID debido al requerimiento de exactitud al ser un equipo de laboratorio.

Para la medición de nivel con el transmisor de presión se realizó un escalamiento por software a la entrada analógica del PLC. La medición de caudal se la realiza en forma de pulsos, para ello se utiliza un transmisor de caudal (Kobold DRS datasheet manual) y la entrada de contador de pulsos rápidos del PLC.

El transmisor de flujo utiliza una librería de frecuencia propia de Siemens para contabilizar sus pulsos; la calibración del transmisor se realizó en base a tiempo de llenado de volumen predeterminado y comparando el resultado con el promedio de flujo resultante del transmisor.

Se realizaron pruebas preliminares para verificar el correcto sentido de giro de la bomba; se procedió a instalar la comunicación con el PLC conectando una salida digital del mismo a una entrada digital del variador para controlar el encendido y apagado del motor; la entrada analógica del variador de frecuencia se conecta con la salida analógica del PLC y además una salida digital configurable del variador de frecuencia se conecta con este para indicar fallos en el funcionamiento del variador. El tiempo de aceleración y deceleración se programó como cinco segundos con el fin de evitar que el sistema desarrolle fallas debido a la gran fuerza de impulso que genera la bomba centrífuga.



El software S7-200 PC Access comunica los datos del PLC S7-200 a través del cable PPI/USB hacia un servidor OPC, el cual a su vez se comunica con el software Kepware para transmitir los datos a Intouch por medio del protocolo FastDDE.

El programa Intouch (gráfico 3) puede enviar datos a Excel para su análisis por medio de protocolo DDE y por medio de tablas en formato \*.csv. Los datos en Excel se analizan mediante los complementos Estadística descriptiva e Histograma. Adicionalmente se utiliza la herramienta de línea de tendencia para obtener una ecuación a partir de un grupo de datos.

Se utiliza el programa Hidroflo<sup>TM2</sup> para calcular la curva del sistema y el momento en que esta interseca con la curva de la bomba para sacar valores aproximados de caudal del sistema.

Las muestras se han tomado en un periodo estable de la variable de proceso teniendo en cuenta la ausencia de perturbaciones como vibraciones indeseadas o escapes de líquido en juntas de tubería. El tamaño de la muestra es de quinientas unidades en periodos de tiempo de uno a cinco minutos.

## 2.2 Ecuación del sistema: nivel de agua en un tanque con una entrada y una salida

El agua entra en el tanque (gráfico 4) desde la parte superior a una velocidad proporcional a la tensión,  $V$ , aplicada a la bomba. El agua sale por una abertura en la base del tanque a una velocidad que es proporcional a la raíz cuadrada de la altura del agua  $H$  en el tanque. La presencia de la raíz cuadrada de la tasa de flujo del agua da lugar a una planta no lineal.

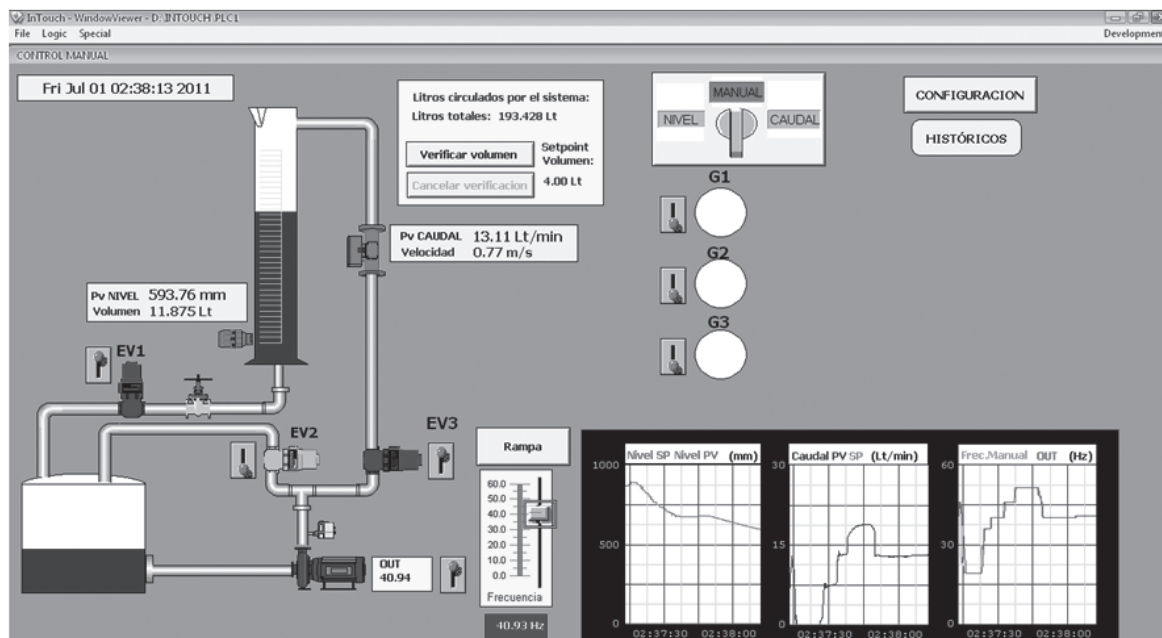


Gráfico 3. Ventana de Intouch

<sup>2</sup> Hidroflo<sup>TM</sup>.

En la siguiente tabla se describen las variables, parámetros, ecuaciones diferenciales, los estados, entradas y salidas del sistema de tanque de agua.

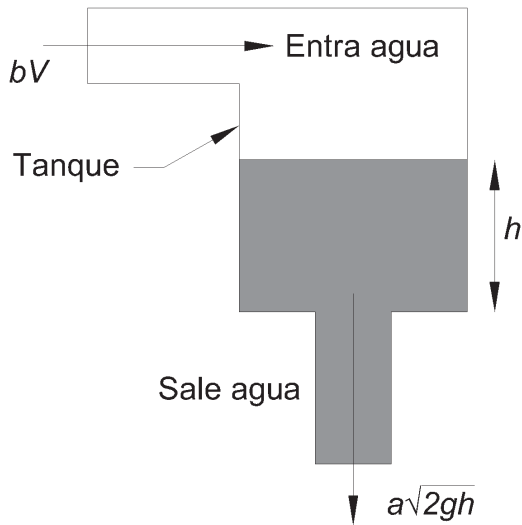


Gráfico 4

Variables	h es la altura del agua en el tanque Vol es el volumen de agua en el tanque V es la frecuencia aplicada a la bomba.
Parámetros	A es la sección transversal del tanque. b es una constante relacionada con el flujo de entrada del tanque. a es una constante relacionada con el flujo de salida del tanque.
Ecuación diferencial	$ddtVol = A \cdot dhdt = bV - a2gh$
Consigna	h
Entradas	V
Salidas	h

### 2.3 Ecuaciones para el control con PID

La operación PID (lazo de regulación con acción proporcional, integral, derivativa) sirve para ejecutar el cálculo PID en la CPU S7200. Para calcular el valor de salida del lazo, la CPU utiliza una ecuación que equivale a:

$$Mn = MPn + MI_n + MDn$$

Salida = Término proporcional + Término integral + Término diferencial

$$MPn = KC * SPn - PVn$$

$$MI_n = KC * TS TI * SPn - PVn + MX$$

$$MDn = KC * TD TS * PVn - 1 - PVn$$

Donde:

MPn valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

KC ganancia del lazo

SPn valor de la consigna en el muestreo n-ésimo

PVn valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo

MI\_n valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

TS tiempo de muestreo del lazo

TI periodo de integración del lazo (también llamado tiempo de acción integral)

MX valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo) (también llamado suma integral o "bias")

MDn valor del término diferencial de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

TD período de diferenciación de lazo (también llamado tiempo de acción derivativa)

SPn-1 valor de la consigna en el muestreo (n-1)-ésimo

PVn-1 valor de la variable del proceso en el muestreo (n-1)-ésimo



### 3. Resultados y discusión

Para calcular la eficiencia de la bomba se obtuvieron los datos simulados a partir de HidrofloTM.

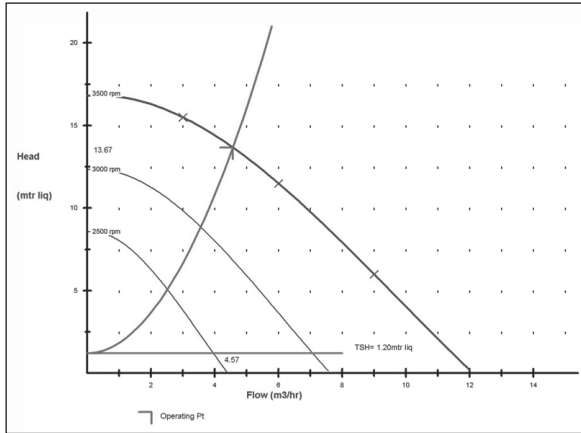


Gráfico 5. Curva del sistema realizada con Hidroflo

Se debe obtener también la relación entre velocidad y caudal que presenta el prototipo en la práctica.

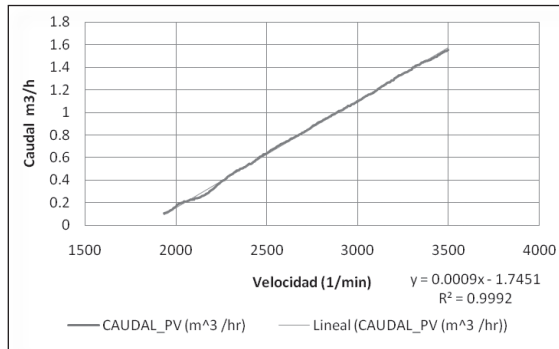


Gráfico 6. Comprobación de la proporcionalidad del caudal vs. velocidad

Se obtiene entonces una tabla de resultados del caudal vs. la velocidad

Tabla 1 Resultados reales vs. simulación		
Caudal = 0,0009*velocidad - 1,7451		
Velocidad	Caudal	Resultados Hidroflo TM
2500	0	2,25
3000	0,9549	2,8
3500	1,4049	4,57

Con la velocidad estimada y la velocidad real se obtiene la eficiencia

$$\text{Eficiencia de la bomba} = \frac{\text{Caudal real} \cdot \text{Caudal simulado}}{\text{Caudal simulado}^2} \cdot 100$$

$$\text{Eficiencia de la bomba} = \frac{1,4049 \cdot 4,57}{4,57^2} \cdot 100$$

$$\text{Eficiencia de la bomba} = 30,74 \%$$

El propósito más importante del prototipo es realizar un lazo cerrado de control en nivel y en caudal; para sintetizarlo de mejor manera se muestran los gráficos que indican el control realizado. En los gráficos, la variable de proceso sigue al setpoint que es siempre horizontal.

Los resultados estadísticos se obtuvieron de la variable de proceso una vez estabilizada; las variables de proceso nunca se estabilizan completamente debido al cambio rápido de valor en las variables de nivel y de caudal por lo que se debe trabajar con rangos de control. Para el nivel se ha probado un rango de control dentro de 2 mm que funciona adecuadamente aún con la ondulación de la variable en el caso del caudal se utiliza un rango de control de 0,5 l/min para comprobar que la variable está estable. La mayor causa de inestabilidad en el nivel es la vibración proporcional a la altura del líquido en el tubo de medición.

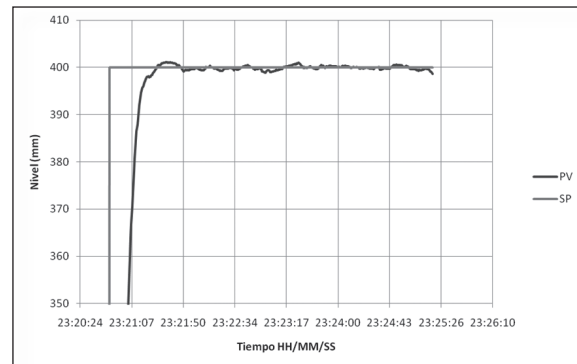


Gráfico 7. Control PID en el nivel

El gráfico 7 indica un control críticamente amortiguado debido a que sobrepasa escasamente el setpoint y tiende a estabilizarse inmediatamente.

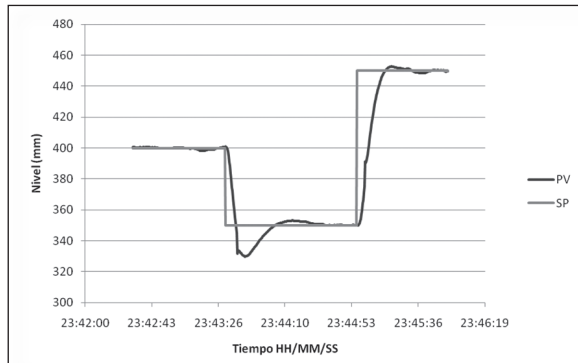


Gráfico 8. Reacción del PID ante cambios de setpoint

El gráfico 8 muestra la variación del setpoint y la reacción de la variable de proceso, la cual sigue el valor requerido con resultado de ondas críticamente amortiguadas.

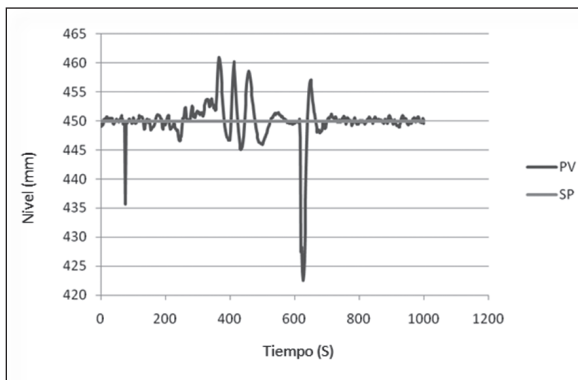


Gráfico 9. Reacción del lazo PID de nivel a perturbaciones

Las perturbaciones son la razón más importante para el uso de control PID porque este busca ser estable aunque la salida no sea con la que se calibró inicialmente. Es la principal diferencia frente a un sistema proporcional o de cualquier otra forma. El algoritmo PID hace posible que el sistema se adapte a las circunstancias buscando la estabilidad de la variable de proceso. La perturbación que se simula en el gráfico 9 es el cierre de una válvula manual situada a la salida del tanque de medición.

El resumen estadístico acerca de la variable de nivel, una vez que se ha estabilizado con un setpoint de 400 milímetros, es el siguiente:

Tabla 2. Datos estadísticos de la variable de nivel en estado estable

PV Nivel	
Media	399,939865
Error típico	0,02063763
Mediana	399,961
Moda	400,1951
Desviación estándar	0,46193257
Varianza de la muestra	0,2133817
Rango	2,6536
Mínimo	398,4781
Máximo	401,1317

En la tabla 2 se puede observar que la media, mediana y moda son similares y corresponden a datos simétricos por lo que sí se puede hablar de estabilización. La desviación estándar menor que 0,5 (mm) y la varianza por debajo de 1 indican que un alto porcentaje de la muestra cumple con una precisión requerida de menos de 1 mm. El rango de 2,6 mm confirma que el nivel puede considerarse estable al no sobrepasar los 5 mm de tolerancia por precisión del transmisor de nivel. El valor mínimo y el valor máximo por encima y por debajo del valor de setpoint indican que el nivel busca estabilizarse y no tiene un error permanente en el control.

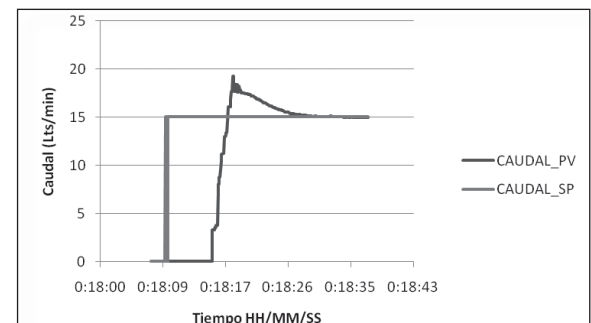


Gráfico 10. Reacción del PID de caudal

El caudal tiene un tiempo corto de estabilización comparado con el nivel y en pocos segundos se adapta a cada nuevo setpoint; debido a la rapidez que tiene para estabilizarse es posible el control que se observa en el gráfico 11, en donde la variable de caudal sigue constantemente al setpoint.

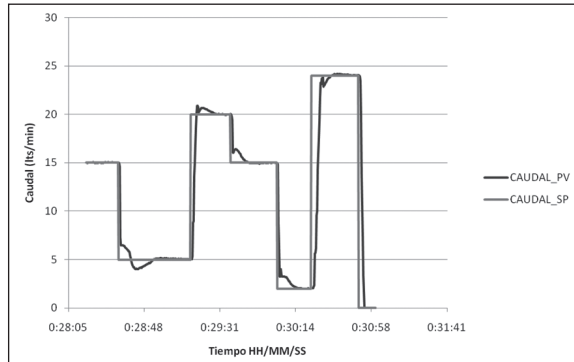


Gráfico 11: Reacción del caudal con cambios en el setpoint

Una vez que el PID se ha estabilizado se han obtenido los siguientes datos estadísticos de la variable de proceso de caudal cuando su setpoint es 15 l/min.

Tabla 3 Datos estadísticos de la variable de caudal	
PV de caudal	
Media	14,9955165
Error típico	0,00090969
Mediana	14,995
Moda	14,9925
Desviación estándar	0,02036153
Varianza de la muestra	0,00041459
Rango	0,12375
Mínimo	14,93625
Máximo	15,06

La desviación estándar es muy pequeña, la varianza es casi despreciable y se acerca a cero lo que indica que casi el 100% de los datos tiene gran precisión con respecto al setpoint. El rango de 0,12 l/min es mínimo. La media, mediana y moda son muy similares lo que indica

simetría en la medición. Los valores mínimo y máximo son casi simétricos con una diferencia de 0,03 l/min por lo que este control tiene una precisión de 0,03 l/min.

### Comprobación de las ecuaciones de sistema y control PID

Se ha realizado un programa en Excel con los datos obtenidos de diferentes pruebas reales para calcular las constantes desconocidas y para verificar la validez de las ecuaciones de nivel del sistema y las de control PID que se usan en el PLC S7-200 de Siemens.

En la tabla 4 se han utilizado parámetros similares como tiempo de ciclo  $T_s = 0,1$  s; constante derivativa  $T_d = 0$ . La variable de tiempo en segundos se encuentra en el eje horizontal y la variable de nivel de líquido en milímetros en el eje vertical. El color rojo se refiere al setpoint y el azul a la variable de proceso el nivel de agua en milímetros.

PARÁMETROS PID KC: 0,1 TI: 0,1 (minutos)

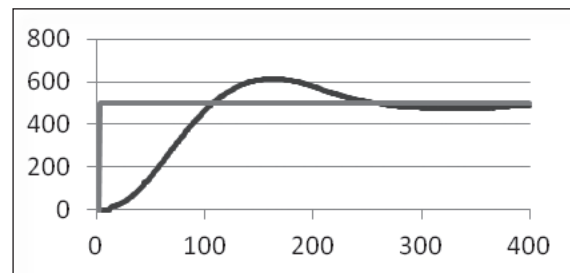


Gráfico 12. Prueba real

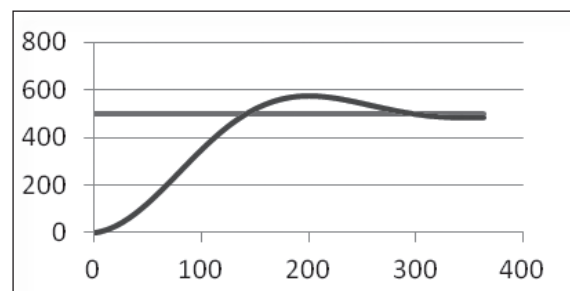


Gráfico 13. Prueba simulada



## PARÁMETROS PID KC: 1 TI: 0,1 (minutos)

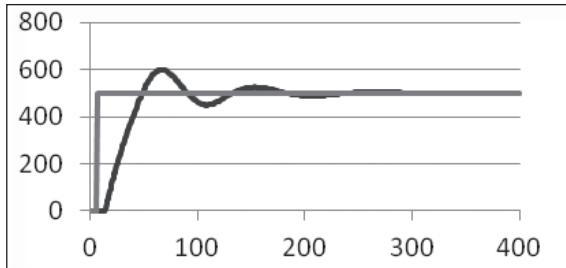


Gráfico 14. Prueba real

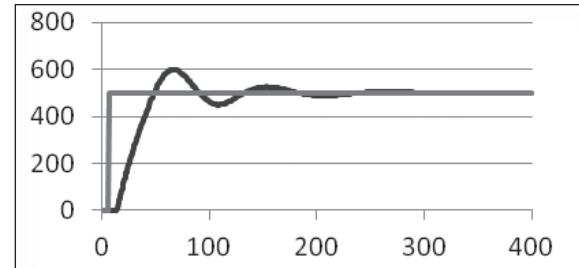


Gráfico 15. Prueba simulada

## PARÁMETROS PID KC: 1 TI: 1 (minutos)

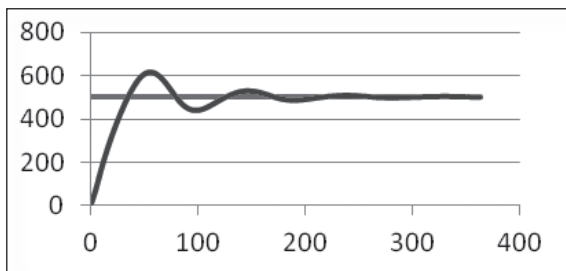


Gráfico 16. Prueba real

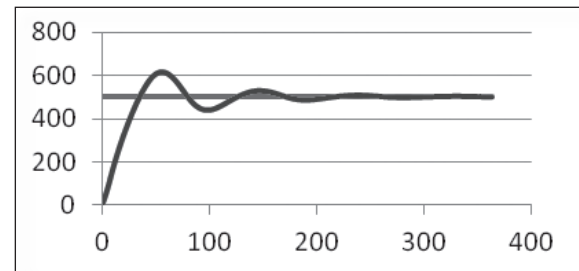


Gráfico 17. Prueba simulada

## PARÁMETROS PID KC: 7,5 TI: 0,21 (minutos)

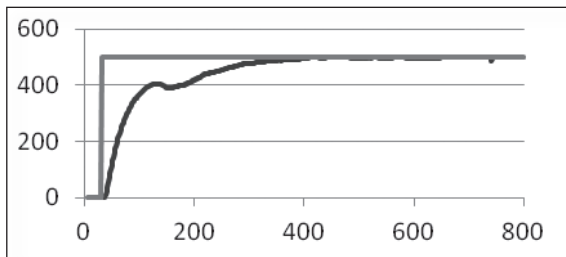


Gráfico 16. Prueba real

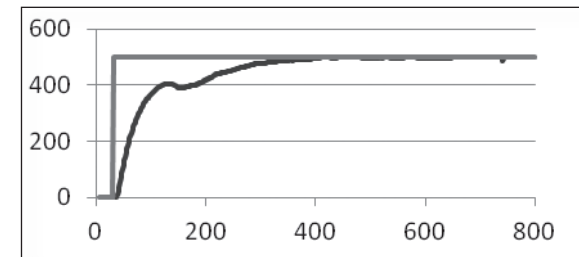


Gráfico 17. Prueba simulada

Tabla 4. Comparación entre datos reales y simulados

Los resultados demuestran una alta similitud entre las formas de las curvas y los tiempos

de estabilización del sistema. Las mayores similitudes se dan debido a que se utilizan ecuaciones ya predeterminadas; sin embargo, se han ignorado aspectos como el tiempo de arranque de la bomba y tiempo muerto en el que el agua recorre los tubos. En todo caso demuestra el principio de funcionamiento del prototipo realizado.

## 4. Conclusiones

El transmisor de presión envía una señal que oscila en un rango de menos de 1 mm una vez filtrada la señal, suficiente para el control visual del nivel en el tanque de medición.

Con la configuración seleccionada de velocidad del cable PPI/USB y con el software In-touch™ la interfaz hombre máquina cumple satisfactoriamente con el requerimiento de si-



multaneidad entre lo que sucede en la pantalla y lo que ocurre en la vida real.

Se debe tener en cuenta el costo de los aparatos antes de iniciar cualquier intento de automatización. Los equipos industriales son costosos y requieren un aporte muy amplio de talento humano para programación. Por esto es necesario analizar detenidamente el costo beneficio que reporta la aplicación.

El PLC S7-200 tiene mucho material de apoyo; sin embargo, para futuros proyectos se recomienda utilizar la nueva versión, el PLC S7-1200, para mayor compatibilidad con versiones recientes de Windows y por su puerto ethernet, el cual tiene un ancho de banda mucho mayor que el cable de conexión PPI.

El control de la variable de nivel depende de tres factores fundamentales: el área transversal del tanque de medición, el flujo de entrada y el flujo de salida. En este prototipo se han hecho pruebas mediante la variación del flujo de entrada proporcional a la velocidad de la bomba lo que se verifica mediante el gráfico 6 del presente documento.

Se ha comprobado que las ecuaciones del sistema de caudal de agua en este tanque y las ecuaciones de control PID son aplicables y tienen un resultado coherente con los datos reales.

## 5. Agradecimientos

Se agradece muy cordialmente a la Universidad Politécnica Salesiana, la cual financió el desarrollo del prototipo a través de la III Convocatoria a Proyectos de Investigación.

## Referencias bibliográficas

Acedo Sánchez, J. 2003. **Control avanzado de procesos**. Impreso por Edigrafos, Madrid. 579 pp.

Cengel Y., Cimbala J. 2009. **Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones**. Mc. Graw Hill Interamericana, México. 956 pp.

Creus, A. 1999. 6.a ed. **Instrumentación industrial**. Alfaomega, Bogotá. 750 pp.

Kuo, B. 2003. 7.a ed. **Sistemas de control automático**. Prentice Hall, México. 904 pp.

Martínez Sánchez, V. 2009. **Potencia hidráulica controlada por PLC**. Alfaomega, México.

Ogata K. 2003. 4.a ed. **Ingeniería de control moderna**. Editorial Pearson, España.

INVENSYS SYSTEMS, INC. InTouch®. 2007. **HMI Concepts and Capabilities Guide**. Revision A. Last Revision: 6/14/07

SIEMENS SIMATIC. 2005. **Manual del sistema de operación S7-200**.

Kobold. **Series DRS turbine flow sensor data sheet manual**. En línea: [http://www.koboldusa.com/datasheet/DRS\\_datasheet\\_man.pdf](http://www.koboldusa.com/datasheet/DRS_datasheet_man.pdf)

