

# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DE NIVEL DE LÍQUIDO<sup>1</sup>

Jonathan D. Krucheski<sup>2</sup>; Franco Joel Olsson<sup>2</sup>; Guillermo A. Fernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Experiencia de cátedra, Trabajo integrador de la asignatura Técnicas Digitales 2, carrera Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM.

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica, jonathankrucheski@gmail.com; francoolsson1995@gmail.com

<sup>3</sup> Tutor del trabajo, Magister Ingeniero Electrónico, fernandez@fio.unam.edu.ar

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño y la construcción de un sistema de control digital de nivel de líquido que utiliza para la medición, un sensor de ultrasonido HY-SRF05 y para la actuación una bomba de 12V controlada mediante modulación de ancho de pulso (PWM). Para el procesamiento de las mediciones, la realización de los cálculos de la acción de control y la generación de la señal PWM, se emplea un microcontrolador PIC18F1320. En este último se implementan las ecuaciones recursivas de control, que corresponden a controladores lineales PI (Proporcional-Integral) y PID (Proporcional-Integral y derivativo). El proyecto plantea también la construcción de una maqueta para el ensayo del mismo, realizada con elementos de bajo costos y asequibles en el mercado local. A continuación, presentamos el diseño y la construcción del prototipo y los resultados de los ensayos realizados que han sido en general aceptables logrando mantener constante la altura de la columna de agua.

**Palabras Claves:** *Control de nivel de líquido; Control digital; Microcontrolador*

## Introducción

En la actualidad existen procesos en los cuales es indispensable mantener constante el nivel de líquido, es decir controlarlo. Estos procesos puede ser de mayor o menor complejidad, dependiendo de las características del líquido y del tanque contenedor (Ballén, González, & Rojas). Por ejemplo, existen casos en los que basta utilizar un flotador conectado a una válvula estranguladora, o un sensor potenciométrico. Estos métodos son intrusivos, ya que el líquido se encuentra en contacto con algún instrumento de medición. Existen casos en los que las características del líquido o del recipiente que lo contiene no permiten este contacto; en estas situaciones es necesario la utilización de métodos no intrusivos, como ser los sensores de radiación, de presión y los de ultrasonidos.

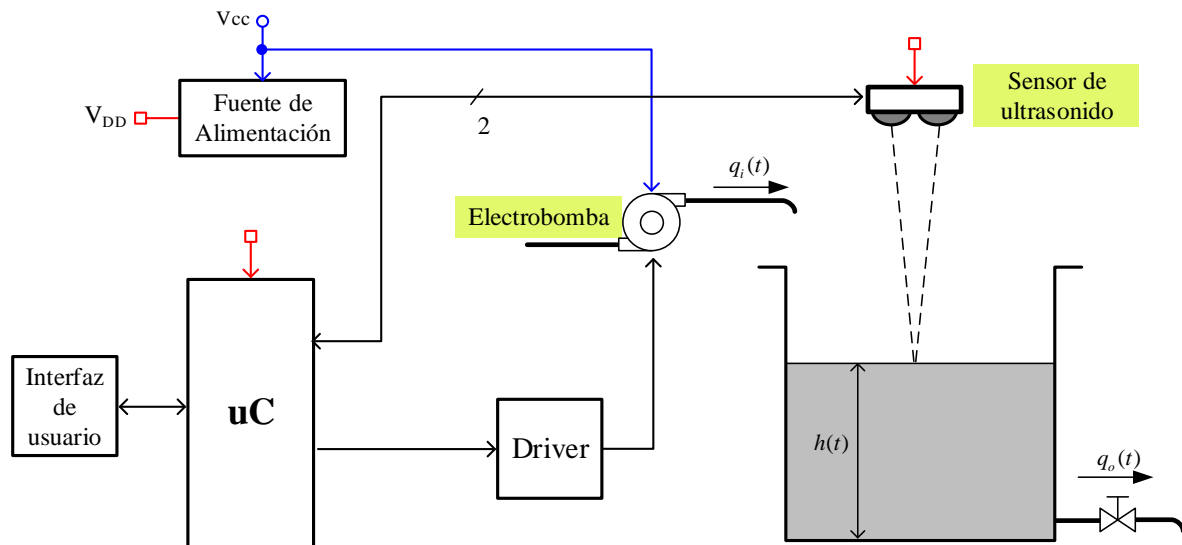
En el marco del trabajo integrador final de la asignatura Técnicas Digitales 2, se propone el desarrollo de un sistema de control de nivel de líquido empleando métodos no intrusivos de medición. A modo de integrar los conocimientos adquiridos en esta materia con los de Control Digital y no Lineal, se utilizará un microcontrolador PIC18F1320 en el cual se implementan compensadores PI y PID que controlan el nivel de líquido (agua) en un

recipiente, manipulando el caudal provisto electrobomba (de 12 V de CC) a través de una técnica de comando por PWM. De esta forma se logra un sistema de control robusto, de bajo costo y con componentes disponibles en el mercado local.

### Metodología

Analizando la problemática planteada, se propone la implementación de un sistema electrónico como el de la Figura 1, el cual permita controlar el nivel de líquido de un recipiente, aplicando acciones de control PI y PID. Estas acciones son aplicadas mediante la modulación de ancho de pulso sobre la tensión de alimentación de la electrobomba encargada de inyectar el flujo de líquido al recipiente.

Para la medición de la altura correspondiente a la columna, se utiliza un sensor de ultrasonido, cuyo funcionamiento se basa en la emisión de pulsos sónicos de alta frecuencia. El sensor activa su salida en alto durante un tiempo directamente proporcional a la distancia que mide. Una vez determinado como debe operar el automatismo propuesto, se identificaron sus etapas, a efectos de diseñar los circuitos necesarios. De esta forma, el sistema implementado ha sido separado en bloques funcionales, como pueden observarse en la Figura 1.



**Figura 1.** Sistema de control de nivel de líquido.

Debido a la disponibilidad en el mercado nacional y por su bajo costo, para el sensor de ultrasonido que indica la Figura 1, se ha seleccionado el HY-SRF05. Ante una señal de disparo, este dispositivo transmite un tren de pulsos de alta frecuencia, pasando en ese momento su salida a un nivel lógico alto. Cuando la cápsula receptora del sensor recibe el tren de pulsos, luego de su reflexión en una superficie, esta salida pasa a un estado lógico bajo. El tiempo que transcurre entre los cambios de estado en la salida, es proporcional a la distancia entre el sensor y la superficie que produjo el eco.

Para la obtención del tiempo del eco y el procesamiento de la misma, se utiliza un microcontrolador PIC18F1320. El mismo está programado para ocupar sus interrupciones

externas, configurando un temporizador el que se encarga exclusivamente de la obtención del tiempo de eco para medir la distancia correspondiente y así determinar el nivel de líquido en el recipiente utilizado en el sistema de la Figura 1. Además, el programa desarrollado para el microcontrolador también calcula de la acción de control a aplicar, considerando el error en la altura de la columna de líquido. Esta acción de control se implementa mediante la utilización del módulo PWM que posee el microcontrolador, el cual, a partir de la acción de control calculada, permite modificar el ciclo útil aplicado a la tensión de alimentación de la electrobomba mediante una etapa de potencia (driver).

La electrobomba utilizada se alimenta con 12V de corriente continua, su función en el sistema de control es proporcionar el caudal de líquido al tanque (recipiente). Para la obtención del modelo matemático que representa a la planta constituida por el conjunto tanque-electrobomba, como se explica más adelante, se partió de la modelación experimental de procesos de sistemas de primer orden; utilizando en este caso el método desarrollado por Ziegler y Nichols. Obtenida la función de transferencia de la planta, se determinaron los parámetros de los compensadores PI y PID utilizando la herramienta SISOTOOL del software MATLAB.

El sistema se desarrolló para ser ensayado utilizando una fuente de laboratorio con los 12V necesarios para la alimentación de la electrobomba. En cuanto a la alimentación del microcontrolador y el sensor de ultrasonido se utilizó un regulador LM7805; su función es proporcionar 5V a partir de los 12V tomados de la fuente de laboratorio.

Diseñado el circuito, el mismo fue simulado y luego ensayado. Dentro de los ensayos realizados se ha comprobado el control del nivel de agua en el tanque y verificado las variaciones de la acción de control. Esta experiencia se realizó armando el circuito diseñado en un protoboard a modo de modificarlo fácilmente ante la necesidad de una corrección. Luego de verificarse la correcta operación del circuito, este último fue implementado en un PCB (*Printed Circuit Board*).

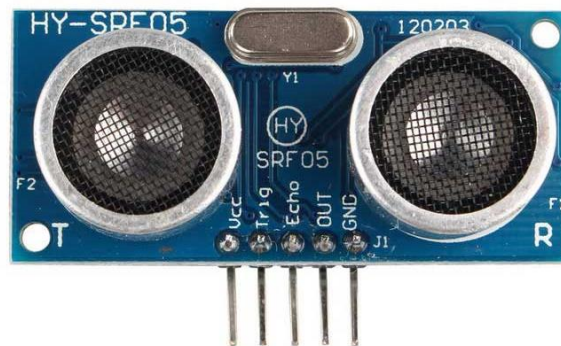
## **Resultados y Discusión**

Como se dijo en la sección anterior, el sensor utilizado para la medición del nivel de líquido es el HY-SRF05, el cual se observa en la Figura 2. El mismo es un sensor de distancias por ultrasonido de bajo costo, que permite un rango de medición de entre 2 cm y 400 cm con una precisión de aproximadamente 2 mm. La distancia puede determinarse midiendo el tiempo que el haz de ultrasonidos generado por el sensor, demora en rebotar sobre alguna superficie que se encuentra en su camino. El sensor HY-SRF05 está constituido por un microcontrolador y dos cápsulas ultrasónicas de 40 kHz, una para la emisión del haz de ultrasonido y otra para recibir el eco del mismo ante la presencia de una superficie donde rebota.

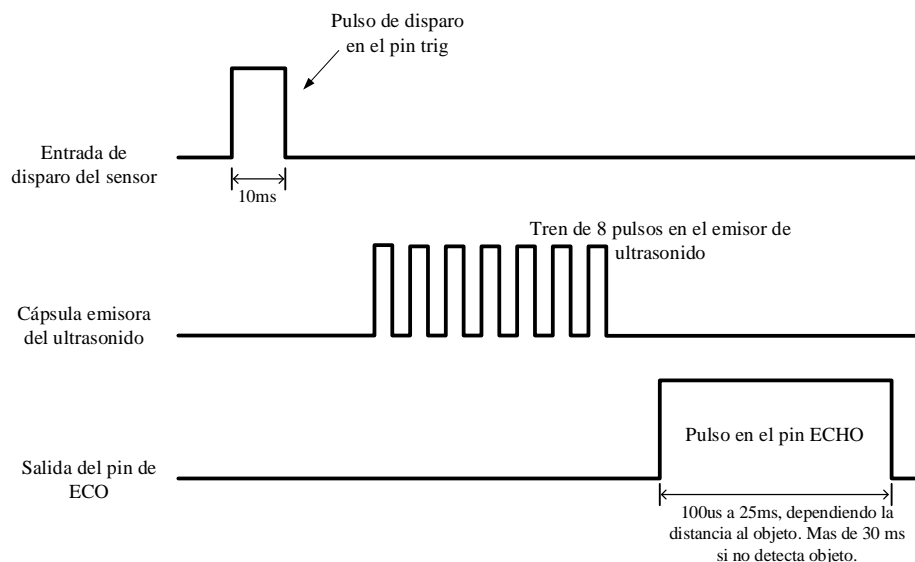
El sensor mencionado, emplea dos pines separados, uno para aplicar el pulso de inicio o Trigger (pin *trig*) y otro (pin *echo*) para medir la anchura del pulso correspondiente a la detección del eco (ver Figura 2). Tal como se muestra en el diagrama de tiempos de la Figura 3, el modo de empleo de este sensor es muy sencillo; el usuario aplica un pulso de disparo o

trigger de 10  $\mu$ s de duración mínima y se inicia la secuencia donde el módulo transmite un tren de pulsos o “burst” de 8 ciclos a 40 kHz. En ese momento, la señal de salida en el pin *echo*, pasa a un estado lógico con nivel “1”. Cuando la cápsula receptora del sensor recibe la señal transmitida como consecuencia de haber rebotado en un objeto (eco), la salida mencionada cambia al estado lógico de “0”. De esta forma, el usuario debe medir la duración del pulso de esta señal, es decir, el tiempo en que la señal de salida del sensor se mantiene a “1” desde el disparo del haz de ultrasonido (Microsystems Engineering).

Con objeto de que el sensor de ultrasonido se estabilice, debe dejarse un lapso de tiempo de 20 ms como mínimo, entre el momento en que la señal de salida en el pin *echo* pasa a “0” y un nuevo pulso de disparo que inicie el siguiente ciclo de medida. Esto permite realizar mediciones cada 50 ms, lo que es igual a una tasa máxima de 20 medidas por segundo (Microsystems Engineering).



**Figura 2.** Sensor de ultrasonido HY-SRF05 (Microsystems Engineering).



**Figura 3.** Funcionamiento del módulo HY-SRF05.

La duración del pulso en el pin *echo* del sensor puede variar entre 100  $\mu\text{s}$  y 25 ms, en función de la distancia entre las cápsulas del mismo y el objeto que se encuentra enfrente. La distancia del sensor al objeto se obtiene dividiendo el tiempo en alto del pulso de pin ECHO por 58 $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Así pues, el rango mínimo que se puede medir con el sensor HY-SRF05 es de 1,7 cm (100 $\mu\text{s}/58\mu\text{s}/\text{cm}$ ) y el máximo de 431 cm (25ms/58 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) (Microsystems Engineering). El sistema de control propuesto en este trabajo, está basado en el microcontrolador PIC18F1320 de la firma Microchip. El mismo se encarga de realizar los cálculos necesarios para determinar el nivel de líquido a partir de la medición del sensor, calcular la acción de control y aplicarla a través de la variación del ciclo útil de la señal PWM que también genera. El PIC18F1320 posee módulos temporizadores y de PWM los cuales son vitales para esta aplicación. Además, posee interrupciones desde varias fuentes. En este trabajo se utilizan las siguientes fuentes de interrupciones:

- Externa INT2 (pin RB2), con una rutina de atención a la interrupción (RSI) que se ejecuta cuando se produce un flanco descendente en la entrada RB2 del microcontrolador. La RSI de esta interrupción es utilizada para seleccionar el setpoint del sistema de control, al pulsar P1 de la Figura 4.
- Externas INT0 (pin RB0) e INT1 (pin RB1), sensibles a flancos ascendentes y descendentes respectivamente. Se utilizan en conjunto para detectar los cambios de estados lógicos en la señal del pin echo correspondiente al sensor de ultrasonido. Al producirse la interrupción INT0 (flanco ascendente) se resetea el Timer1 el cual está configurado con un prescaler de 1 de tal manera que a cada oscilación dura 1 $\mu\text{s}$  (utilizando un cristal externo 4MHz); mientras que al producirse la interrupción INT1, se guarda el valor del Timer1, el cual será el tiempo en microsegundos que estuvo en alto la señal en el pin ECO.

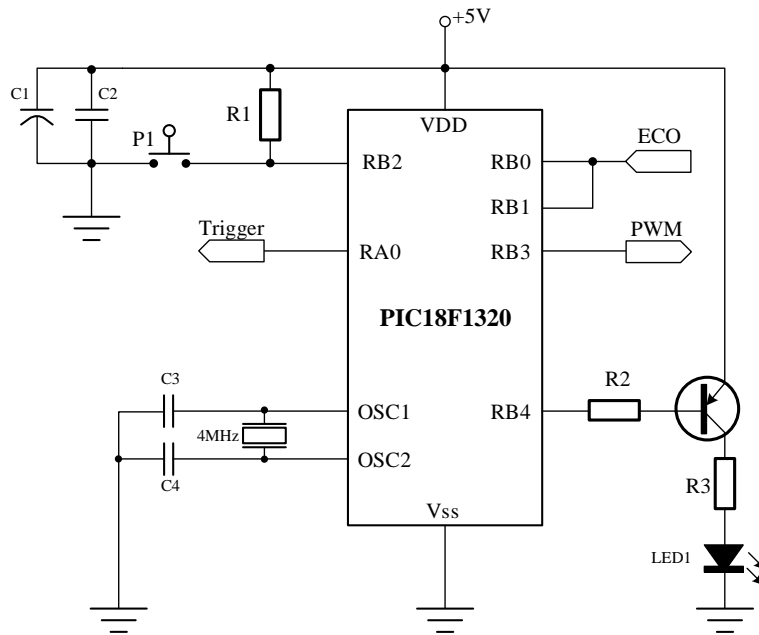
Cabe mencionarse que salida RA0 del microcontrolador, es utilizada para proporcionar la señal de disparo del sensor (trigger) del sensor de ultrasonido. En la Figura 4 se aprecia el diagrama esquemático del conexionado del PIC18F1320 (Microchip Engineering Inc., 2007), indicando todas las señales mencionadas.

Como se dijo anteriormente, el caudal de la electrobomba es controlado mediante una señal PWM cuyo ciclo útil es proporcional a la acción de control calculada por el microcontrolador. Dicha señal pasa a través de una etapa de potencia o Driver para adaptar, que adapta su nivel para manipular la tensión de alimentación requerida por la electrobomba. Esta adaptación se realiza mediante el circuito de la Figura 5.

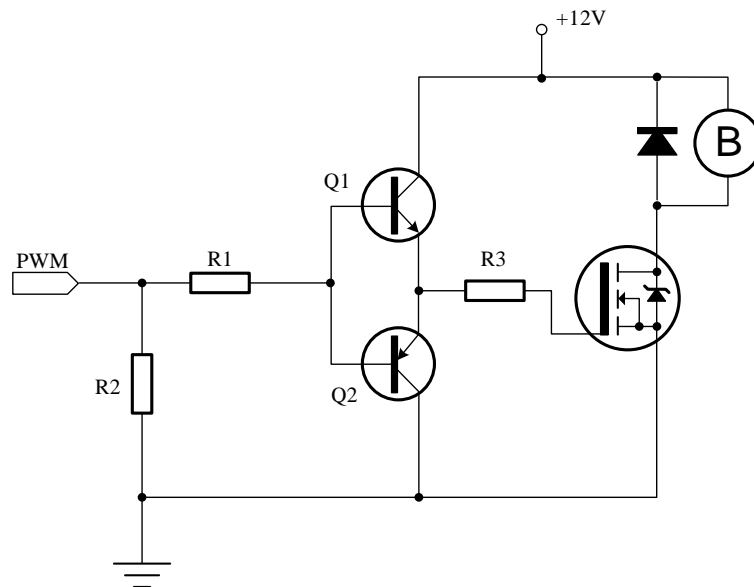
A la hora de la puesta en funcionamiento de determinado proceso que opera de forma controlada en lazo cerrado, se requiere la realización adecuada del proyecto de los parámetros del controlador. Para proyectar correctamente estos parámetros, es necesario en primer lugar identificar la dinámica del proceso a controlar, o sea, la función de transferencia  $G_p(s)$  de la planta.

Para la obtención del modelo de planta formada por el tanque y la electrobomba, se mide la variación de nivel de líquido en el tanque luego al realizar una variación abrupta del 0% al 50% en el ciclo útil de la señal PWM que comanda la tensión nominal de la electrobomba.

Los datos relevados para este ensayo, pueden visualizarse en la línea de puntos mostrada en la Figura 6.



**Figura 4.** Diagrama esquemático del conexionado del PIC18F1320.



**Figura 5.** Circuito esquemático del Driver.

Debido a la respuesta obtenida en la Figura 6, la planta de este sistema de control, se modela como un sistema de primer orden más atraso de transporte, cuya función de transferencia es:

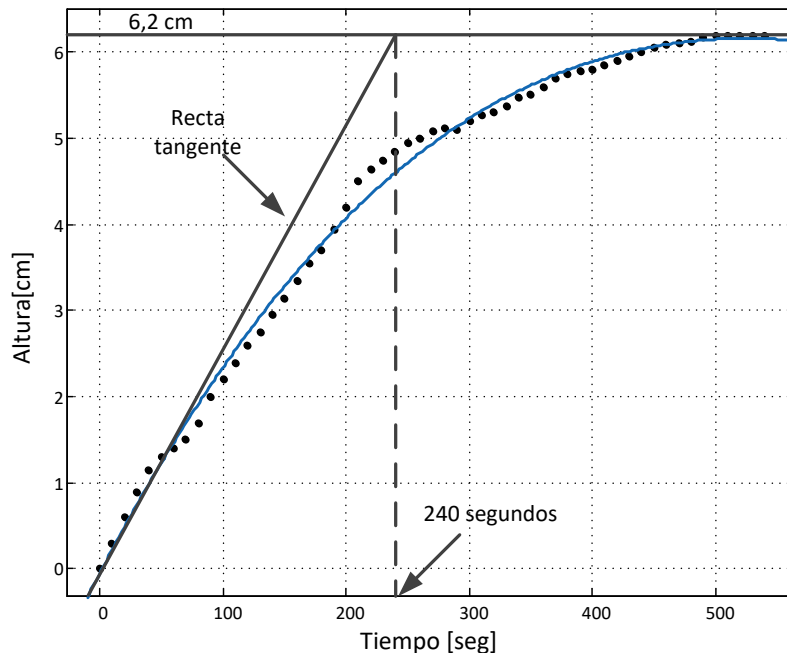
$$G_p(s) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Para identificar los parámetros  $K_p$ ,  $\tau$  y  $\theta$  se utilizó el método de Ziegler y Nichols. La constante de tiempo  $\tau$  es determinada por el intervalo de tiempo entre el punto donde la recta tangente corta al eje de tiempo y el punto obtenido a través de la proyección sobre el eje del tiempo de la intersección entre la tangente y la recta representado por el valor final finito al que tiende la variable de salida del proceso. En la Figura 6 se observa que el valor es de  $\tau = 240\text{seg}$ . La ganancia estática  $K_p$  se determina por el cambio total en la altura dividido la tensión media, representada por la aplicación del ciclo útil del 50% de los 12V:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{6,2\text{cm}}{6\text{V}} = 1,03 \frac{\text{cm}}{\text{V}} \quad (2)$$

En cuanto al atraso de transporte se considera insignificante respecto a la constante de tiempo del proceso, por lo cual el modelo de planta resulta en:

$$G_p(s) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{1,03}{240s + 1} \quad (3)$$



**Figura 6.** Respuesta del nivel de líquido en el tanque, ante una variación en escalón aplicada al ciclo útil de la señal PWM que comanda a la electrobomba.

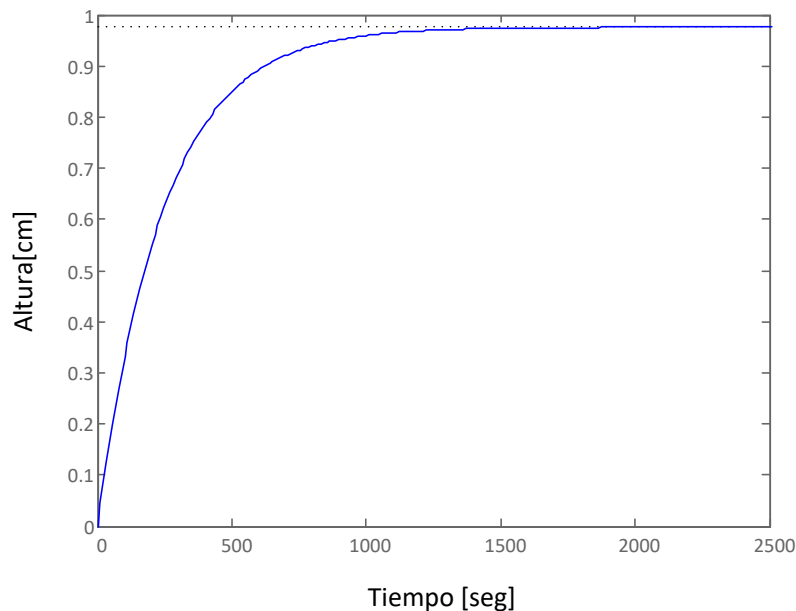
La Figura 7 muestra la respuesta al escalón correspondiente al modelo de la planta a lazo abierto indicado en (3). Mediante el software Matlab se obtiene que el tiempo de subida a lazo abierto es de 536 segundos; lo que nos permite elegir sin ningún problema un **periodo de muestreo de 1 segundo** para el sensado del nivel de líquido en el tanque.

Para el diseño del compensador PI se utiliza la herramienta SISOTOOL del software Matlab, eligiendo como especificación un tiempo de asentamiento de 150 segundos, ante la entrada al escalón. Con ello, para el controlador se obtiene la siguiente función de transferencia en tiempo discreto:

$$G_c(z) = \frac{9,572z - 8,954}{z - 1} \quad (4)$$

En la Figura 8 puede observarse la respuesta del sistema compensado, ante una entrada al escalón, verificándose el tiempo de asentamiento propuesto como parámetro de diseño. A partir de la función de transferencia del compensador (3), se puede llegar a la ecuación recursiva implementada para calcular la acción de control en el microcontrolador, resultando:

$$u_{PI}(k) = u(k-1) + 9,572e(k) - 8,954e(k-1) \quad (5)$$



**Figura 7.** Respuesta al escalón de la planta a lazo abierto.

La acción derivativa también se obtuvo utilizando la herramienta SISOTOOL, resultando:

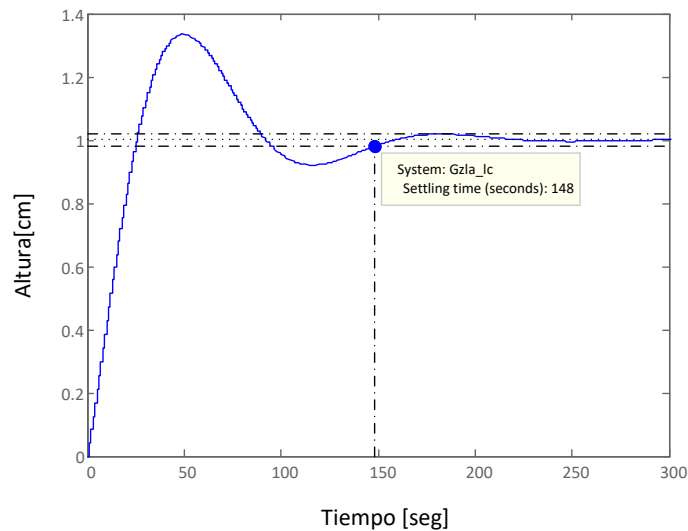
$$u_D(k) = 5(e(k) - e(k-1)) \quad (6)$$



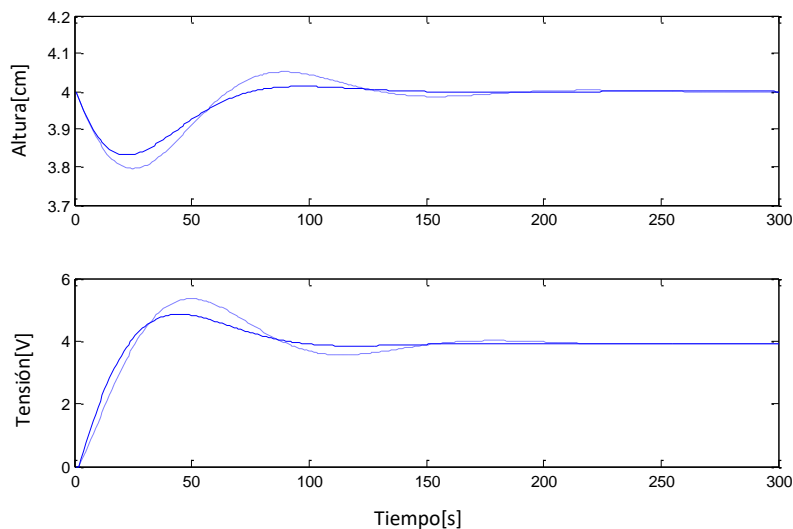
Y la acción de control total PID resulta en la siguiente ecuación recursiva:


$$u_{PI}(k) = u(k-1) + 9,572e(k) - 8,954e(k-1) + 5(e(k) - e(k-1)) \quad (7)$$

En condiciones de funcionamiento, el controlador obtendrá la referencia de una primera medición y adaptará la acción de control a partir de las sucesivas mediciones. Por ello, en la primera comparación, el error será nulo y no habrá acción de control; teniendo en cuenta que, si hay pérdidas, el tanque comenzara a descargarse. Este comportamiento puede observarse en la simulación de la Figura 9. Para la simulación se supuso una altura de referencia de 4cm.



**Figura 8.** Respuesta al escalón de la planta compensada.



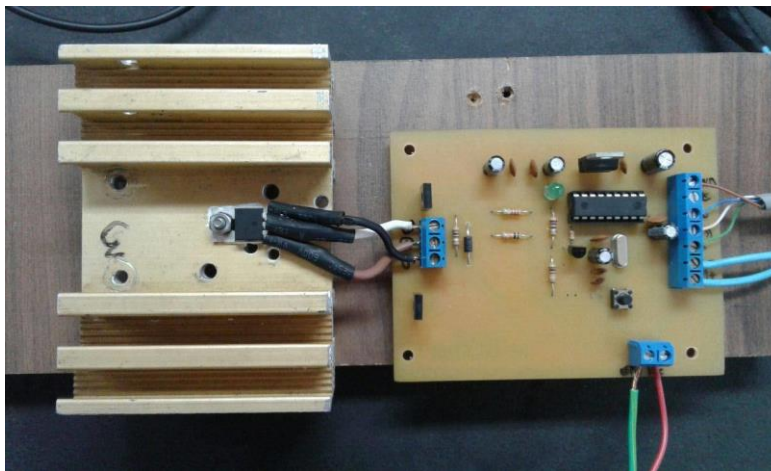
**Figura 9.** Respuesta del sistema para una referencia de 4 centímetros y acción de control. En línea continua acción PI. En línea a trazos acción PID. 

En cuanto a los ensayos experimentales, se pudo comprobar que tanto el controlador PI como el PID logran estabilizar la salida de la planta (nivel de líquido en el tanque) con error en régimen permanente nulo. No obstante, no se verifica la igualdad en los tiempos de asentamiento ni en los porcentajes de sobrepaso con los simulados matemáticamente. Además, se visualiza en la acción de control oscilaciones que no se corresponden a un correcto desempeño del mismo. Una de las posibles causas es un error en el casting de las variables; otra posible causa es un comportamiento incorrecto del sensor ultrasónico o un error en el accionar de las interrupciones.

En la Figura 10 y en la Figura 11 se puede observar el sistema implementado en su totalidad.



**Figura 10.** Bomba, tanque y sensor de ultrasonido.



**Figura 11.** Circuito implementado.

## **Conclusiones**

En base a los resultados obtenidos durante los ensayos realizados, puede concluirse que el sistema propuesto se comporta de manera aceptable, logrando mantener constante a la altura de la columna de agua. No obstante, se encontraron numerosos problemas en el comportamiento de la acción de control, siendo necesaria una verificación del software

implementado. Por otra parte, este trabajo contribuyó a la integración de los conceptos desarrollados en las asignaturas Técnicas Digitales 2 y Control Digital y No Lineal, permitiendo adquirir experiencia en el diseño de circuitos, en la resolución de problemas, modelado de sistemas, sintonización de controladores y su programación en microcontroladores. En síntesis, el trabajo realizado reforzó numerosos conceptos de las asignaturas; quedando como opción un mejoramiento del sistema utilizado.

### **Referencias**

Ballén, J., González, M., & Rojas, A. (s.f.). *Sistema de control análogo de flujo y nivel de líquido*. Sante Fé de Bogotá, Colombia.

Microchip Engineering Inc. (2007). Datasheet del PIC18F1x20.

Microsystems Engineering. (s.f.). Apunte sobre el Módulo SRF05. Viscaya, Bilbao, España.