

Proyecto de Ingeniería Aplicada

Controlador digital proporcional usando “ARDUINO UNO” para el control de nivel de líquido de un tanque

Proportional digital controller using “ARDUINO UNO” for liquid level control of a tank

Elías Prudencio Chavez Jaldin 1. Edgar Roberto Ramos Silvestre 2.
 Alison Carmen Estrada Carpio 3. Pablo Vargas Rosas 4.

1. Ingeniero Electrónico, Docente Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, elias_1335@hotmail.com
2. Ingeniero Electrónico, Maestría en Tecnología de Computo, Director Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, eramoss@univalle.edu
3. Estudiante de Ingeniería Biomédica. Universidad Privada del Valle Cochabamba, Cochabamba, alisonestradacarpio@gmail.com
4. Estudiante de Ingeniería Biomédica. Universidad Privada del Valle Cochabamba, Cochabamba, pablitovalo@gmail.com

RESUMEN

El diseño de un controlador digital para el control de nivel de líquido de un tanque se inició obteniendo la función de transferencia de la planta: sistema de nivel líquido. Se tomó en cuenta la estructura de un sistema de control digital seleccionando el sensor, el actuador y el circuito de potencia adecuados para la planta. Continuando con un breve repaso sobre la teoría de control digital, se estudiaron los métodos de discretización de la función de transferencia y el diseño de controladores digitales usando el método de lugar de raíces. Se adquirieron de datos para caracterizar la planta usando MATLAB; luego se comparó con la función de transferencia, inicialmente encontrada para el ajuste final, se usó la función rltool de MATLAB para el diseño digital. Se procedió a la simulación en bloques en SIMULINK, configurando las limitaciones físicas reales del sistema. Se implementó el código del controlador digital diseñado en el entorno de desarrollo integrado de la tarjeta de desarrollo electrónico Arduino, hallando al transformada Z inversa previamente. Se almacenó los datos en MATLAB y se procedió a la comparación de los resultados de simulación mostrando coherencia. Se observó que es suficiente un diseño de control

proporcional para este tipo de sistemas de primer orden que cuentan con su polo en el origen. Los sensores de ultrasonido son precisos en la medición de altura de nivel de agua a diferencia de los sensores infrarrojos.

Palabras claves: Control digital. Controlador proporcional. Planta. MATLAB. Transformada Z.

ABSTRACT

The design of a digital controller for the liquid level control of a tank was started by obtaining the transfer function of the plant: liquid level system. The structure of a digital control system was taken into account by selecting the appropriate sensor, actuator and power circuit for the plant. Continuing with a brief review of digital control theory, the discretization methods of the transfer function and the design of digital controllers using the root-pace method were studied. Data were acquired to characterize the plant using MATLAB; then compared to the transfer function, initially found for final adjustment, the MATLAB rltool function was used for the digital design. Simulation in blocks was carried out in SIMULINK, configuring the real physical limitations of the system. The code of the digital controller designed in the integrated development environment of

the Arduino electronic development board was implemented, finding the Z transform inverse previously. The data was stored in MATLAB and the simulation results were compared showing consistency. It was observed that a proportional control design is sufficient for this type of first order systems that have their pole at the origin. Ultrasound sensors are accurate in measuring water level height unlike infrared sensors.

Keywords: Digital control. Proportional controller. Plant. MATLAB. Z transform.

INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el empleo de una tarjeta electrónica de desarrollo o computador digital como dispositivo de control ha aumentado debido a la disminución de su precio, incluyendo la abundancia de sensores compatibles con las mismas (Dorf & Bishop, 2005). Una computadora digital o tarjeta de desarrollo electrónico a menudo aloja el algoritmo del controlador en un sistema de control realimentado. Dado que la computadora digital o tarjeta de desarrollo electrónico recibe datos solo a intervalos específicos (muestreo), es necesario desarrollar e implementar un método para describir y analizar el rendimiento del sistema de control para el mismo (Dorf & Bishop, 2011).

En la actualidad, todos los aspectos teóricos de la teoría de sistemas de control automático se centran en el procesamiento digital. Por este motivo, los sistemas analógicos (denominados planta o proceso del mundo natural) deben conectarse a unidades informáticas, debido a su alta eficiencia, rapidez y confiabilidad. Esta combinación de los sistemas analógicos y sistemas digitales exige el desarrollo de un sistema mixto o híbrido (Veloni & Miridakis, 2017).

Otro aspecto fundamental en los diseños de sistemas de control digital es la simulación. El proceso de simulación ofrece una capacidad de diseñar probando la operación, el rendimiento y características de los sistemas sin intervención directa o real. El examinar el comportamiento de un sistema mediante simulaciones permite realizar cambios y corrección de errores antes de la implementación real del sistema (Veloni & Miridakis, 2017).

En el presente artículo se busca demostrar la coherencia que existe entre la simulación y la situación práctica, desarrollando un programa e implementarlo en la tarjeta de desarrollo ARDUINO UNO como resultado del método de diseño propuesto por la teoría de sistemas de control digital. El diseño e implementación del controlador es aplicado a la planta (sistema de nivel de líquido) que cuenta con una ecuación diferencial lineal.

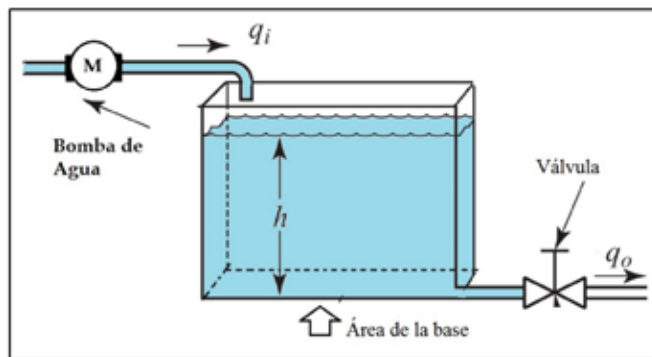
METODOLOGÍA

Modelo Matemático del sistema de nivel de líquido

En el análisis de sistemas que implican el fluido de líquidos, es necesario dividir los regímenes en laminar y turbulento, según la magnitud del número de Reynolds, si este número es mayor a 3000 se considera un flujo turbulento, si es menor a 2000 se considera un flujo laminar. En los laminares el flujo es estable, y por tanto se puede representar mediante ecuaciones diferenciales lineales (Ogata, 2010). En el presente artículo se diseña para un sistema de flujo laminar.

Se considera que el cambio de volumen en el tanque, mostrado en la Figura 1, es igual a la diferencia del flujo de entrada y el flujo de salida, ecuación (1) (Hernández, 2010).

Figura N°1. Sistema de nivel de líquido



Fuente: Elaboración propia. 2020.

$$dV/dt = q_i - q_o \quad (1)$$

V: Volumen del tanque (m³)q_i: Caudal del líquido en la entrada (m³/s)q_o: Caudal del líquido en la salida (m³/s)

El área de la base, A (Figura 1) permanece constante, pero su altura, h, cambia, por lo tanto, se tiene la ecuación (2):

$$V = Ah \quad (2)$$

Se reescribe la ecuación (1), como se muestra en la ecuación (3):

$$\frac{dAh}{dt} = q_i - q_o$$

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \quad (3)$$

En el sistema el caudal de salida permanece cerrado, y es considerado como perturbación, de tal forma que interesa solamente la altura del tanque que es seleccionado por el usuario. Tomando en cuenta estas consideraciones, la ecuación (3) se reduce a una simple ecuación lineal de primer orden, ecuación (4), considerando condiciones ideales igual a cero:

$$A \frac{dh}{dt} = q_i \quad (4)$$

Para hallar la función de transferencia de la planta, se usa la herramienta matemática de la transformada de Laplace en la ecuación (4), considerando el parámetro de entrada el caudal q_i, y parámetro de salida la altura h del líquido en el tanque (considerando condiciones iniciales igual a cero), ecuación (5):

$$\mathcal{L}\left\{A \frac{dh}{dt} = q_i\right\}$$

$$AsH = Q_i$$

$$G(s) = \frac{H}{Q_i} = \frac{1/A}{s} \quad (5)$$

Las dimensiones de la base del tanque son de 27x27 [cm], por tanto, el área de la base es:

$$A = 0.27 * 0.27 = 0.079 \text{ [m}^2\text{]}$$

Por tanto, la función de transferencia de la planta es dada por la ecuación (6):

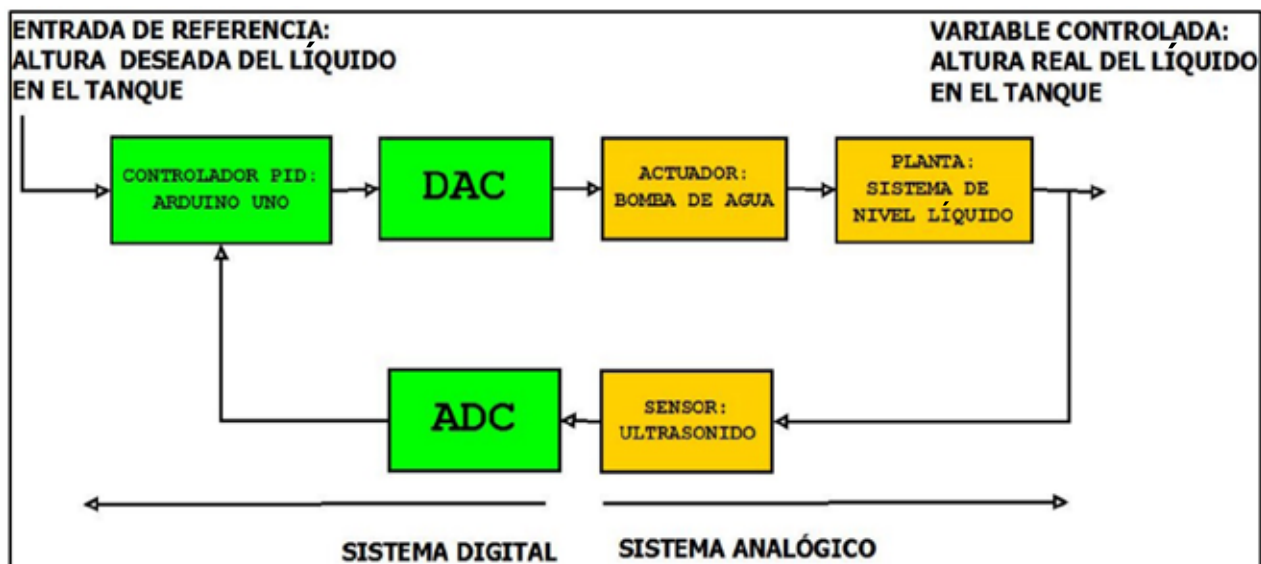
$$G(s) = \frac{13.717}{s} \quad (6)$$

Estructura de un sistema de control digital

Para controlar un sistema o proceso físico utilizando un controlador digital, el controlador debe recibir mediciones del sistema, procesarlas y luego enviar señales de control al actuador que efectúa la acción de control (Fadali & Visioli, 2013).

En esta aplicación, se usa un actuador analógico, la planta es un sistema analógico, y por tanto pertenece a un dominio diferente al controlador; es necesario un convertidor de dominios, esto se realiza mediante un convertidor digital análogo (digital-to-analog converter DAC, por sus siglas en inglés) La medición de la altura es analógico, por tanto, se necesita un convertidor análogo digital (analog-to-digital converter ADC, por sus siglas en inglés). La combinación de todos estos elementos discutidos se muestra en la Figura 2, existen variaciones en esta configuración, pero no forman parte del presente diseño (Fadali & Visioli, 2013).

Figura N°2. Estructura de un sistema de control digital



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Se debe entender que se habla de dos sistemas: digital y analógico (Figura 2) en el plano digital se usa el ARDUINO UNO, y en el plano analógico se tiene varias etapas, para el actuador la bomba de agua, el sensor un ultrasonido, y la planta el tanque de agua.

El actuador: Bomba de agua y circuito de potencia.

Se usa una bomba de diafragma R385, de desplazamiento positivo, sus características esenciales se muestran la Tabla 1.

Tabla N°1. Características de la bomba de diafragma R385

Altura máxima.	3 m
Voltaje nominal.	12V DC
Corriente de trabajo.	0.5~0.7 A
Caudal de flujo.	1.5 ~ 2L/min (aprox.)

Fuente: Hansontec. 2020.

Para el accionamiento de la bomba (Figura 3) se usa un interruptor de estado sólido, un transistor Darlington, TIP 122, trabajando en las dos regiones de corte y saturación. El cálculo de saturación del transistor Darlington se describe a continuación. Para garantizar una saturación fuerte, la ganancia de corriente de saturación del transistor β_{SAT} debe valer un cuarto de la ganancia de corriente nominal del transistor β (Neamen, 2009), ecuación (7).

Figura N°3. Bomba de agua R385



Fuente: Elecrow. 2020.

$$\beta_{SAT} = \frac{\beta}{4} \quad (7)$$

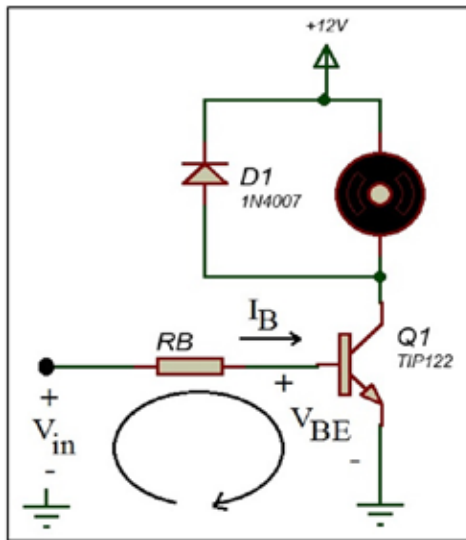
Para garantizar la saturación la corriente de base I_B , debe ser mayor a la corriente de colector I_C dividido entre el β_{SAT} , se tiene la ecuación (8):

$$I_B > \frac{I_C}{\beta_{SAT}} \quad (8)$$

Usando ley de voltajes de Kirchhoff, mostrado en la Figura 4, se tiene la ecuación (9) que es el resultado de reemplazar la ecuación (8):

$$\begin{aligned} -V_{in} + R_B * I_B + V_{BE} &= 0 \\ I_B &= \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} \\ \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} &> \frac{I_C}{\beta_{SAT}} \\ R_B &< \beta_{SAT} \left(\frac{V_{in} - V_{BE}}{I_C} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Figura N°4. Circuito de potencia para el accionamiento de la bomba de agua

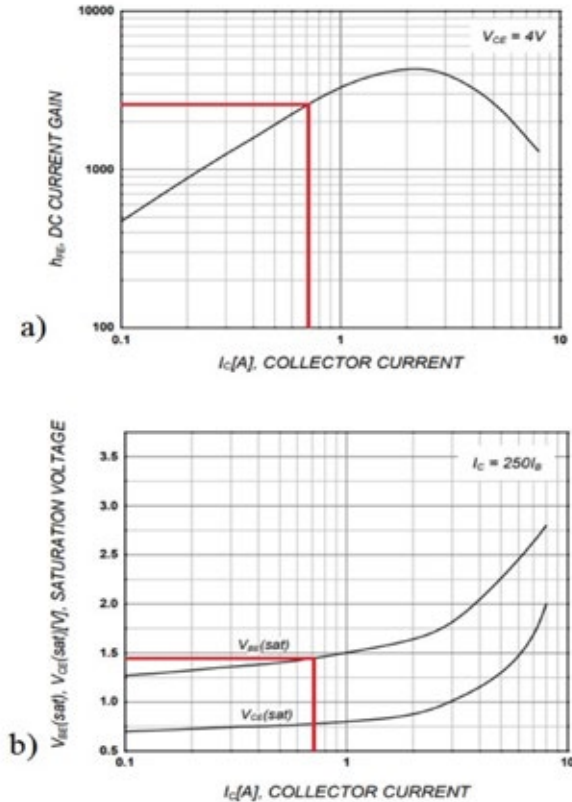


Fuente: Elaboración propia. 2020.

La corriente máxima del motor (ver tabla 1) es 0.7 A, este llega a ser la corriente de colector ($I_C=0.7A$). En la Figura 5 se muestra las curvas proporcionadas por el fabricante, donde se evaluó

el valor de la ganancia de corriente y voltaje base emisor en el valor de la corriente anteriormente mencionada.

Figura N°5. a) Ganancia de corriente DC b) Voltaje Base emisor de saturación y voltaje colector emisor



Fuente: On Semiconductor. 2020.

En base a la Figura 5 el valor de β es aproximadamente 3000, y el voltaje base emisor de saturación es 1.5V. Por tanto,

$$\beta_{SAT} = \frac{\beta}{4} = \frac{3000}{4} = 750$$

Reemplazando en la ecuación (9), $V_{in}=5V$;

$$R_B < 750 \left(\frac{5 - 1.5}{0.7} \right)$$

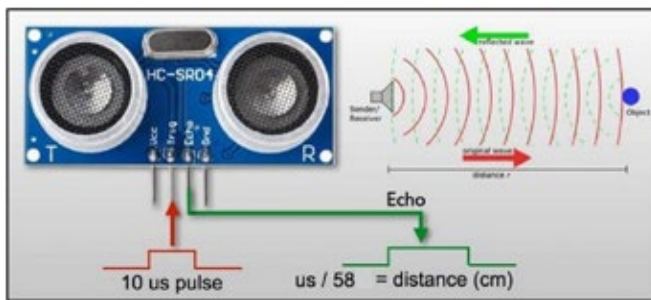
$$R_B < 3.75 \text{ k}\Omega$$

Para garantizar la saturación se debe usar un valor de R_B menor a 3.75 kΩ.

Sensor de medición de altura de líquido

Para la medición de la altura se usó el sensor ultrasonido HC-SR04, mostrado en la Figura 6, debido a que el ultrasonido tiene buena respuesta ante el líquido debido a la diferencia de impedancias acústicas (Cabral, 1999), la frecuencia de la onda ultrasónica del sensor es de 40 kHz, la onda viaja en el aire a una velocidad de 340 m/s, y retorna al encontrar un objeto en su camino. La distancia medida (d) depende de la velocidad en el aire (V_s en m/s), el tiempo de viaje (t_v en segundos) que incluye de ida y vuelta dividida entre 2 (Cabral, 1999), ecuación (10).

Figura N°6. Sensor de ultrasonido HC-SR04



Fuente: Starware. 2020.

$$d = V_s * \frac{t_v}{2} \quad [m] \quad (10)$$

El sensor envía un pulso en microsegundos (t_{μs}) proporcional al tiempo de viaje, y como se muestra en la Tabla 2, la distancia máxima de medición es cuatro metros, por lo que conviene realizar la medición en centímetros, reemplazando el valor de la velocidad del sonido en el aire en la ecuación (10) y realizando la conversión de la distancia a centímetros, se tiene la ecuación (11).

Tabla N°2. Características del sensor ultrasonido HC-SR04

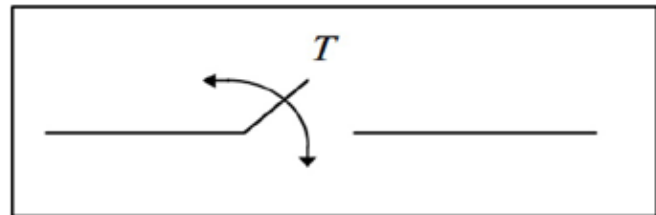
Voltaje nominal	5V
Corriente nominal	15mA
Frecuencia de operación	40kHz
Distancia máxima	4 m
Distancia mínima	2 cm
Ángulo de medición	15°

Fuente: MPJA. 2020.

Modelo ADC

Se debe asumir lo siguiente: las salidas del ADC son exactamente iguales en magnitud a sus entradas, el ADC produce una salida digital instantánea y el muestreo (T) es perfectamente uniforme (es decir, ocurre a una velocidad fija) (Fadali & Visioli, 2013). El modelo en los sistemas de control digital se muestra en la Figura 7.

Figura N°7. Modelo del muestreador ideal de un ADC



Fuente: Fadali & Visioli. 2013.

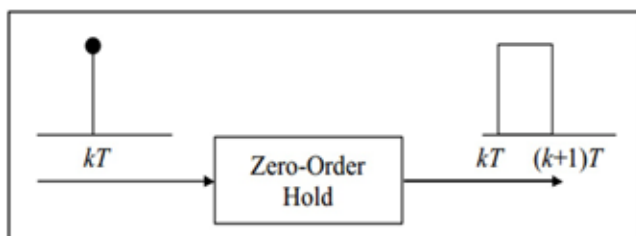
En la práctica se busca cumplir estas condiciones, y sobre todo mantener constante el tiempo de muestreo, debe usarse los temporizadores de los microcontroladores, en este caso se usó un tiempo de muestreo de 200 ms, lo que quiere decir que la medición de la distancia del nivel de líquido se realiza cada 200 ms.

Modelo DAC

Se asume que las salidas DAC son exactamente iguales en magnitud a sus entradas, el DAC produce una salida analógica instantáneamente, las salidas DAC son constantes durante cada

período de muestreo (Fadali & Visioli, 2013). Para la reconstrucción de las señales analógicas se tiene varias herramientas matemáticas como el retenedor de orden cero, retenedor de primer orden, retenedor de segundo orden, pero el que se acomoda apropiadamente a un sistema de control digital y el más sencillo es el retenedor de orden cero o ZOH (zero-order hold ZOH por sus siglas en inglés) (Fadali & Visioli, 2013). Su modelo se muestra en la Figura 8.

Figura N°8. Modelo de un DAC con retención de orden cero (ZOH- Zero-Order Hold)



Fuente: Fadali & Visioli. 2013.

La función de transferencia del retenedor de orden cero o ZOH, ecuación (12):

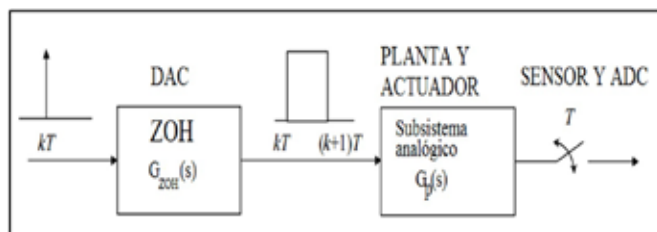
$$G_{ZOH}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad (12)$$

Modelamiento de un sistema de control digital

1. Función de transferencia de la combinación de un DAC, subsistema analógico y ADC

La conexión en cascada de un DAC, un subsistema analógico y un ADC se muestra en la Figura 9.

Figura N°9. Conexión en cascada de un DAC, subsistema analógico y un ADC



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Como el análisis es en el campo digital (Transformada Z), y el sistema a controlar está en el campo analógico (transformada de Laplace), la función de transferencia (G_{ZAS}) en el plano Z de la conexión mostrada en la Figura 9 se puede representar por la ecuación (13):

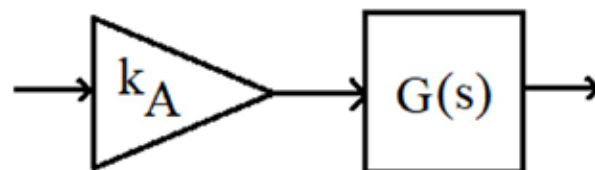
$$G_{ZAS}(z) = (1 - z^{-1}) * \mathcal{Z} \left\{ \frac{G_p(s)}{s} \right\} \quad (13)$$

2. Obtención de la función de transferencia de la planta y el actuador usando MATLAB

El actuador junto el valor DAC “ k_A ” y la planta “ $G(s)$ ” puede ser modelado matemáticamente de la siguiente forma mostrado en la Figura 10 y la ecuación (14):

$$G_p(s) = k_A G(s) \quad (14)$$

Figura N°10. Diagrama de bloques de la planta y el actuador



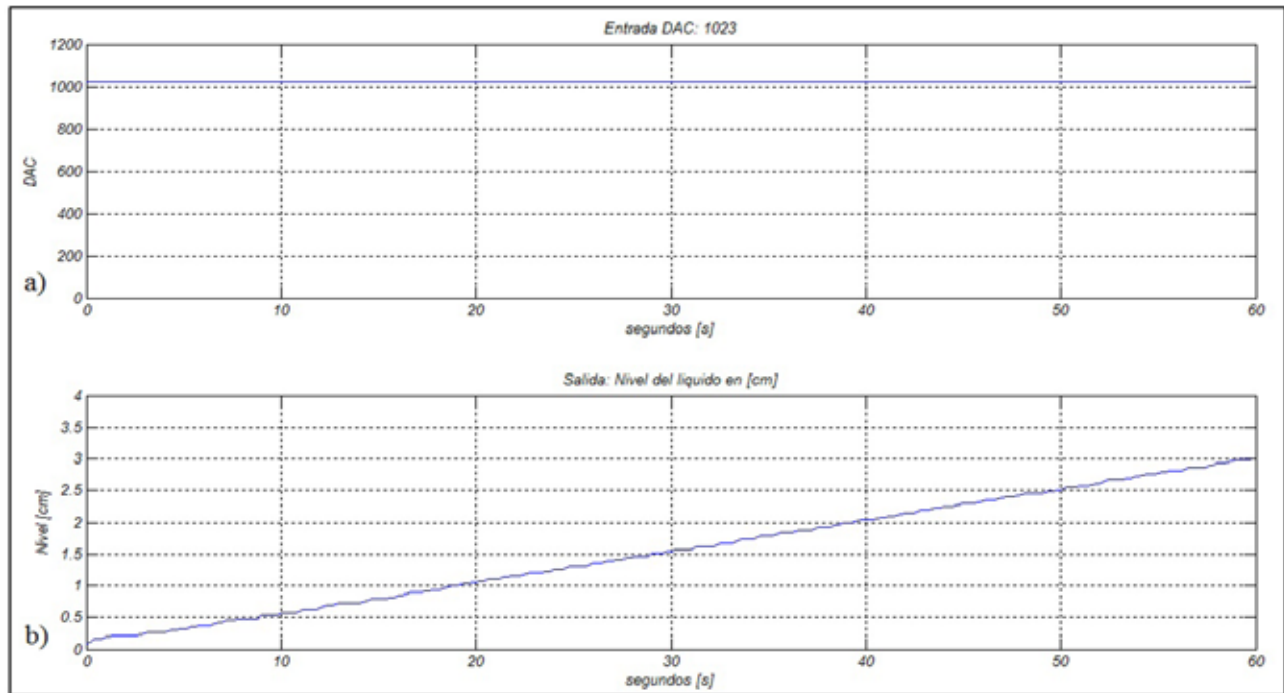
Fuente: Elaboración propia. 2020.

Remplazando $G(s)$ ecuación (6) en (14), se llega a la ecuación (15):

$$G_p(s) = \frac{13.717 * k_A}{s} \quad (15)$$

Se activa la bomba de agua a 12V (1023 el valor del PWM para el DAC), usando el sensor de ultrasonido y el ARDUINO UNO como tarjeta de adquisición de datos, enviando datos con la comunicación serial a una velocidad de 115200 baudios a la computadora al programa de MATLAB, un tiempo de muestreo de 200 ms, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 11, con 300 muestras, teniendo un tiempo de prueba total de 60 segundos.

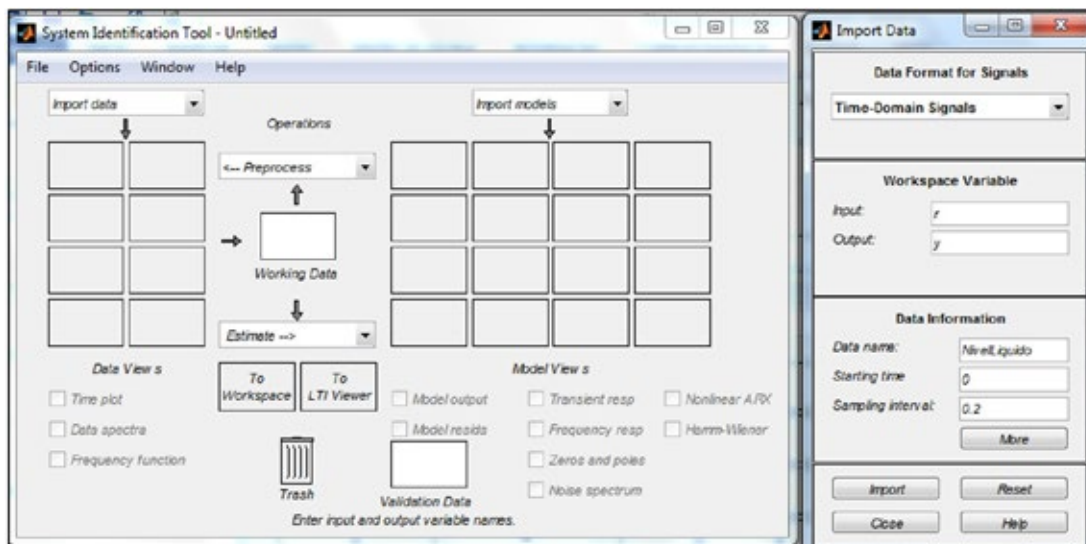
Figura N°11. a) Entrada escalón de prueba, DAC=1023 equivale a 12V,
b) Datos reales del nivel de líquido de la planta.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

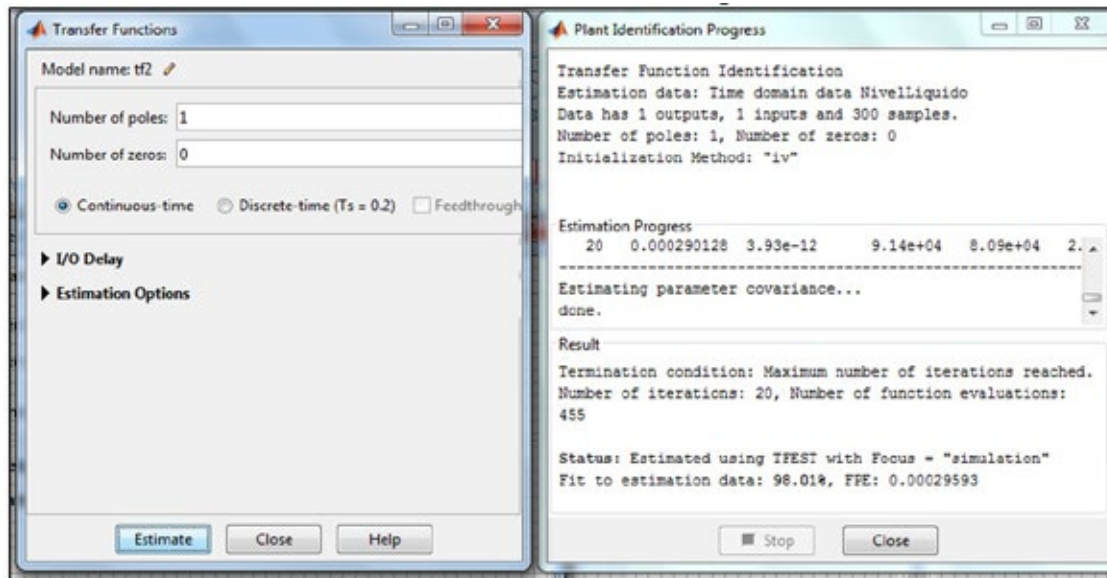
Para la obtención de la función de transferencia de la planta junto al actuador, se usa la función `ident` de MATLAB mostrado en la Figura 12. El valor para la estimación de la función de transferencia se elige consultando la ecuación (15), que sugiere ningún cero y un polo, estos parámetros se introducen y se obtiene la función de transferencia aproximada de la planta junto al actuador, como se muestra en la Figura 13.

Figura N°12. Importación de datos usando la función `ident` de MATLAB, entrada DAC=1023 la variable “r”, salida la variable “y”, tiempo de muestreo de 200 [ms]



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Figura N°13. Izquierda: Parámetros para la estimación de la función de transferencia.
 Derecha: Resultado de la estimación, con una aproximación del 98%



Fuente: Elaboración propia. 2020.

La función de transferencia propuesta por MATLAB es dada por la ecuación (16):

$$G_p(s) = \frac{4.802 * 10^{-5}}{s + 4.415 * 10^{-14}} \quad (16)$$

La raíz del denominador de la ecuación (14) es muy próxima a cero, por tanto, este valor es omitido, y comparando con la ecuación (15), se obtiene la función de transferencia de la planta junto al actuador, ecuación (17):

$$G_p(s) = \frac{4.802 * 10^{-5}}{s} \quad (17)$$

Para obtener la función de transferencia en el plano Z, se usa la ecuación (13):

$$G_{ZAS}(z) = (1 - z^{-1}) * Z \left\{ \frac{\left(\frac{4.802 * 10^{-5}}{s} \right)}{s} \right\}$$

Usando el comando c2d de MATLAB, con un periodo de muestreo de 200ms, y retención de orden cero ("ZOH") (Figura 14).

Figura N°14. Código para la conversión del dominio continuo a discreto

```
>> num=4.802e-05;
>> den=[1 0];
>> sys=tf(num,den);
>> sysd=c2d(sys,0.2,'zoh')
sysd =
  9.604e-06
  -----
  z - 1
Sample time: 0.2 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Fuente: Elaboración propia. 2020.

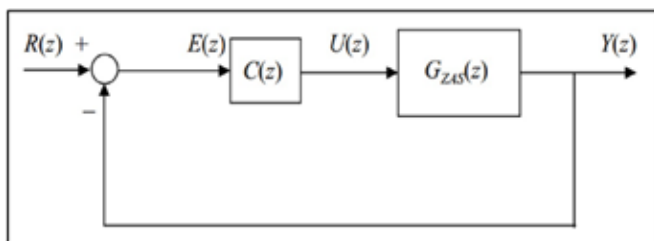
Y se obtiene la ecuación (18):

$$G_{ZAS}(z) = \frac{9.604 * 10^{-6}}{z - 1} \quad (18)$$

DISEÑO DEL CONTROLADOR DIGITAL

El sistema completo del sistema de control digital es el mostrado en la Figura 15, donde el controlador a diseñar es $C(z)$.

Figura N°15. Diagrama de bloque del sistema de control digital de lazo cerrado simple.



Fuente: Fadali & Visioli. 2013.

La planta, ver ecuación (18), solo tiene un polo en la unidad, por tanto, esto sugiere un controlador proporcional, ecuación (19):

$$C(z) = k \quad (19)$$

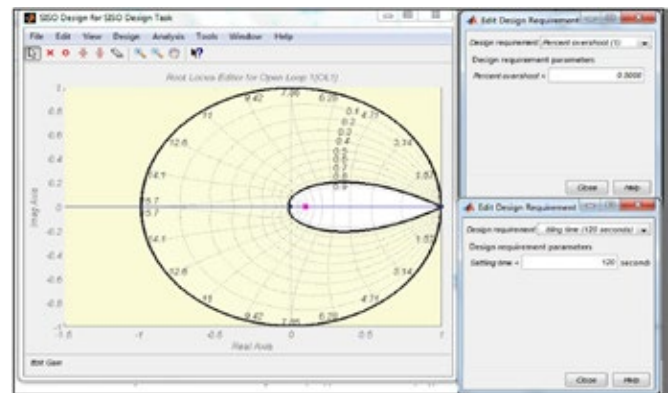
El diseño debe cumplir los siguientes requerimientos (Hernández, 2010; Ogata, 2010):

- Tiempo de estabilidad menor a 120 segundos.
- Sobre impulso menor al 0.5%
- Error en estado estacionario de cero.

Estos requerimientos y la planta se introducen en MATLAB con la función `rltool`, como se muestra en la Figura 16.

Figura N°16. Izquierda: Herramienta de diseño de controladores digitales en MATLAB.

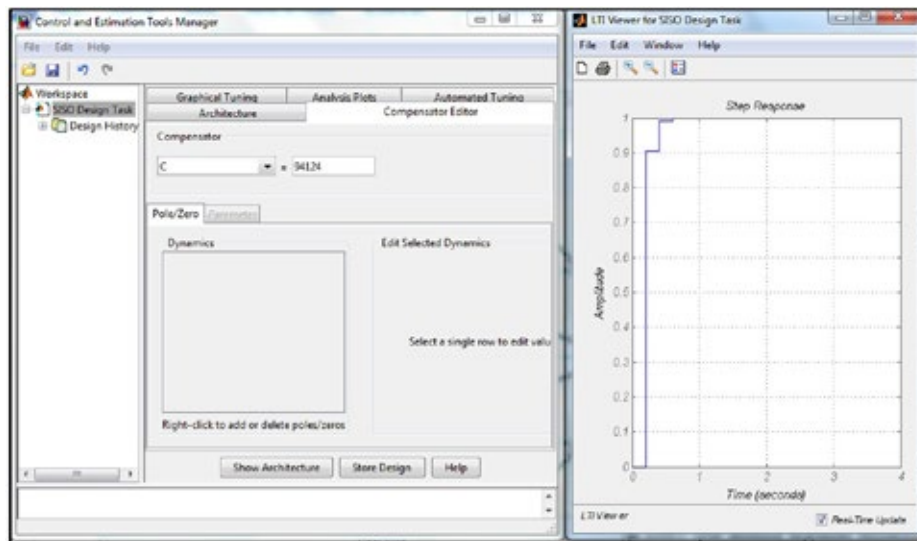
Derecha: Requerimientos de diseño, tiempo de estabilidad menor a 120 [s] y sobre impulso o Overshoot menor al 0.5%.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

La ventaja de esta herramienta es el diseño gráfico del controlador digital, eligiendo la raíz dominante (de color púrpura) dentro de la zona de solución (de color blanco) mostrada en la Figura 16, para obtener un controlador con el valor mostrado en la Figura 17, que en el lado izquierdo muestra el valor del controlador digital, y en el lado derecho su respuesta ideal ante una entrada escalón unitario.

Figura N°17. Izquierda: Valor del controlador digital proporcional.
 Derecha: Respuesta al escalón unitario



Fuente: Elaboración propia. 2020.

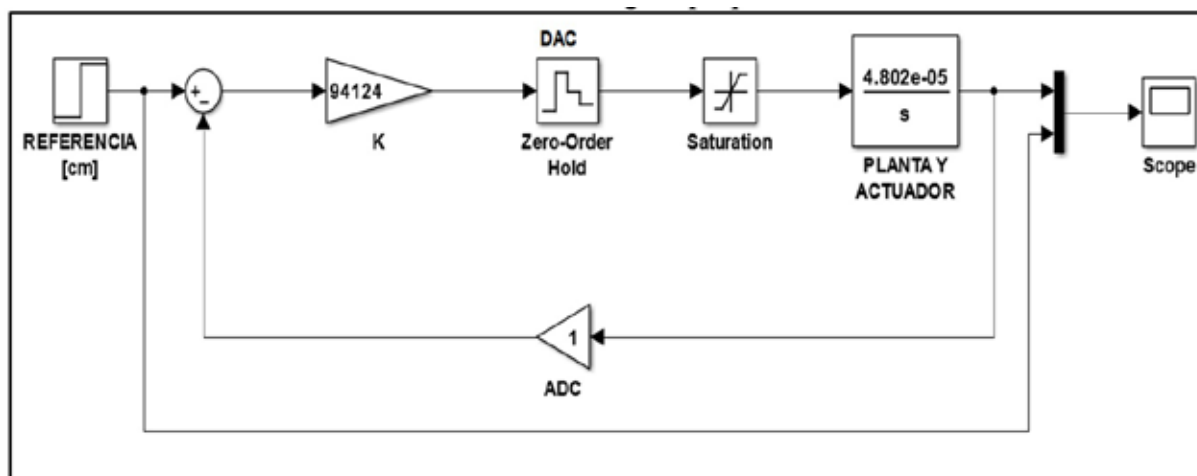
Con los datos mostrados en la Figura 17, se establece que el controlador digital proporcional, ecuación (20).

$$C(z)=94124 \quad (20)$$

Simulación del diseño del control digital proporcional en SIMULINK – MATLAB

Para verificar el diseño se usa SIMULINK (herramienta usada para diseños basado en modelos) de MATLAB, como se muestra en la Figura 18, se añade un bloque de saturación, este último se usa para emular la situación real de todo el sistema, su parámetro máximo 1023 que es el valor DAC máximo del sistema, y el mínimo es 0.

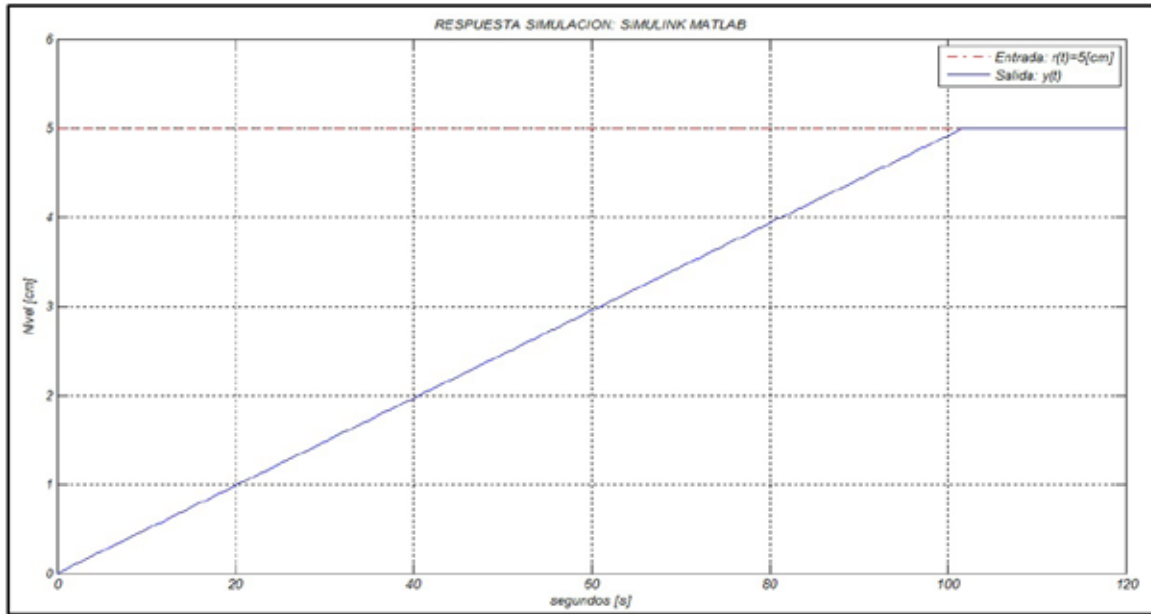
Figura N°18. Diagrama de bloques usando SIMULINK de MATLAB para la simulación de respuesta real del sistema de control digital proporcional



Fuente: Elaboración propia. 2020.

La respuesta se muestra en la Figura 19, se aprecia que para una entrada escalón de 5 [cm] el tiempo de estabilidad del sistema es aproximadamente 102 segundos, error en estado estacionario de cero, y sobre impulso cero.

Figura N°19. Respuesta en el tiempo del sistema de control digital proporcional usando SIMULINK – MATLAB



Fuente: Elaboración propia, 2020.

Implementación del control digital proporcional

Como se observa en la Figura 15, el controlador $C(z)$ cuya entrada es el error $E(z)$ y salida es $U(z)$, se tiene la ecuación (21):

$$U(z) = C(z) * E(z) \quad (21)$$

Ahora, la ecuación (20) en (21) y, hallando la transformada Z inversa, surge la ecuación (22):

$$Z^{-1}\{U(z)=94124E(z)\}$$

$$Z^{-1}\{U(z) = 94124E(z)\}$$

$$u[n] = 94124 * e[n] \quad (22)$$

Se obtiene la ecuación (23):

$$e[n] = \text{Referencia} - \text{Valor medido} \quad (23)$$

Las ecuaciones (22) y (23) forman parte del código en el ARDUINO UNO, e[n] de tipo float y u[n] es de tipo long, debido a que el tipo int provoca desborde de memoria de variable. El encabezado y declaración de variables, mostrado en la Figura 20.

Figura N°20. Declaración de variables

```
#include <TimerOne.h>
const int actuador = 10;
/// sensor ultrasonido
const int Trigger = 2;
const int Echo = 3;
/// Variables
float Nivel_Real = 0, Referencia = 5.0;
const unsigned int At = 200; //Tiempo de muestreo 200ms
unsigned long tiempoArduino;
// Control proporcional
float Kp = 94124;
float error;
long U;
```

Fuente: Elaboración propia. 2020.

La iniciación de configuración se muestra en la Figura 21.

Figura N°21. Configuración inicial del programa

```
void setup() {
  pinMode(actuador, OUTPUT); // salida DAC
  Timer1.initialize(50); // 50us o 20Khz -Frecuencia
  PWM
  Serial.begin(115200);
  pinMode(Trigger, OUTPUT); //pin como salida
  pinMode(Echo, INPUT); //pin como entrada
  digitalWrite(Trigger, LOW); //Inicializamos el pin
  con 0
  AlturaReal();
  error = Referencia - Nivel_Real; // e[n]
  tiempoArduino = millis();
}
```

Fuente: Elaboración propia. 2020.

La lectura de la medición del nivel del líquido usando el sensor ultrasonido mostrado en la Figura 22.

Figura N°22. Cálculo de la medición de altura

```
void AlturaReal()
{
  long t; //tiempo del eco
  float d; //distancia
  digitalWrite(Trigger, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(Trigger, LOW);
  t = pulseIn(Echo, HIGH); //Ancho del pulso
  /// Valor ajustado de 58.8 a 57.5
  d = t / 57.5; //Distancia en cm
  Nivel_Real = 36.5 - d;
}
```

Fuente: Elaboración propia. 2020.

Y por último, el programa principal mostrado en la Figura 23.

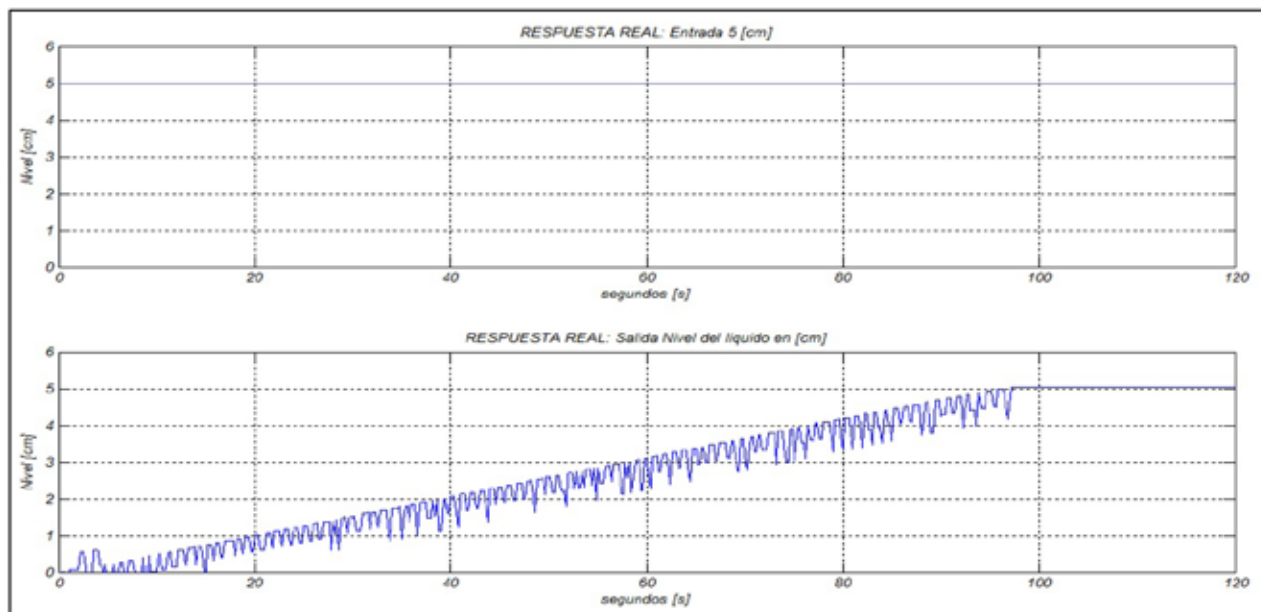
Figura N°23. Cálculo de la medición de altura

```
void loop() {
  if (millis() > (tiempoArduino + At))// muestreo cada 200ms
  {
    tiempoArduino = millis();
    // Envio de datos al puerto Serial
    Serial.print(Referencia);
    Serial.print(",");
    Serial.println(Nivel_Real);
    // Calculo del error
    AlturaReal();
    error = Referencia - Nivel_Real; // e[n]
    // control proporcional
    U = Kp * error; // u[n]=Kp*e[n]
    if (U > 1024)
    {
      Timer1.pwm(actuador, 1023);//DAC
      return;
    }
    if (U < 0)
    {
      Timer1.pwm(actuador, 0);//DAC
      return;
    }
    Timer1.pwm(actuador, U); // DAC
  }
}
```

Fuente: Elaboración propia. 2020.

Los resultados se muestran en la Figura 24, se observa que el tiempo de estabilidad es 98 segundos.

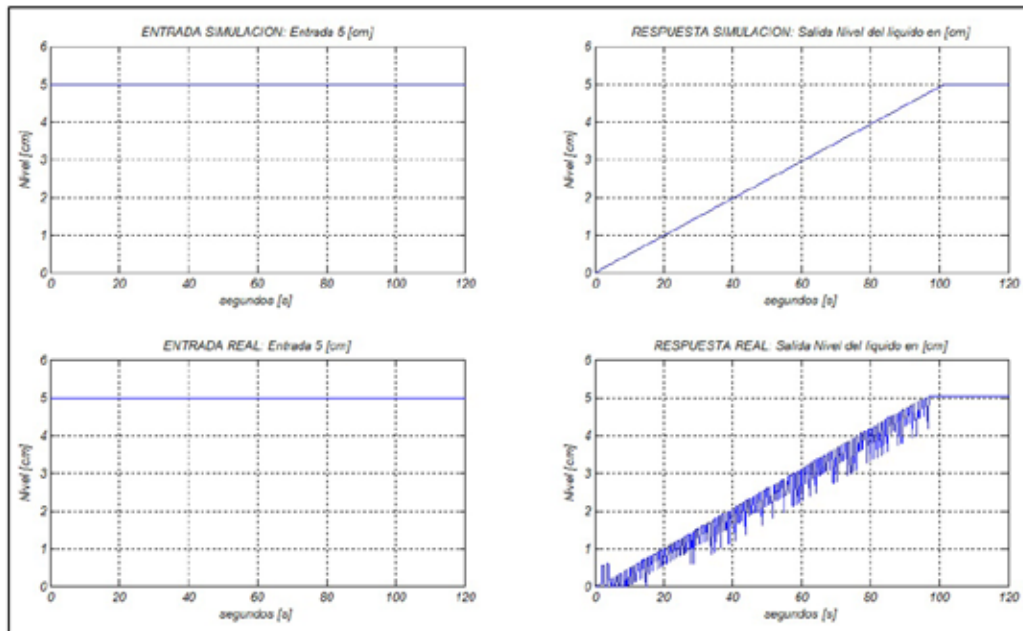
Figura N°24. Arriba: Entrada de referencia de 5 [cm]
Abajo: Salida del Nivel del líquido



Fuente: Elaboración propia. 2020.

En la Figura 25 se muestra los datos de simulación usando MATLAB-SIMULINK, y los datos reales de la planta, se observa que se cumple con los requerimientos citados anteriormente.

Figura N°25. Arriba: Resultados de la simulación del modelo del sistema de control digital.
 Abajo: Respuesta real del sistema de control digital



Fuente: Elaboración propia. 2020.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La obtención del modelo matemático en forma analítica de la planta, ecuación (5) y la ecuación (15), facilita en el ajuste final en la identificación de la función de transferencia obtenido en MATLAB.
- La función de ident de MATLAB es una herramienta que facilita la obtención de los datos del sistema, la lectura del sensor de ultrasonido presenta ligeras distorsiones en sus lecturas para lo cual se debe realizar la corrección de los datos antes de ser analizados.
- Para aplicar la teoría de sistema de control es muy importante la selección adecuada del sensor, el sensor infrarrojo GP2Y0A21 no logra medir adecuadamente cuando se trata de un líquido, el sensor de ultrasonido HC-SR04 tiene mejor respuesta con ligeros errores de medición. Al obtener la función de transferencia usando MATLAB, la planta tiene un polo en el origen (en el plano S) o un polo en la unidad (en el plano Z), lo que garantiza un error en estado estacionario cero y sugiere un simple controlador proporcional o controlador P para evitar sobre impulsos. Al implementar el diseño se observa en la Figura 19 que existe una cercanía entre lo simulado y lo real.
- No todos los diseños de controladores digitales deben ser estrictamente controladores PID (Proporcional Integral Derivativo), depende mucho de la función de transferencia de la planta, en esta situación la planta se modela con una función de transferencia sencilla y por tanto un controlador sencillo; el controlador tipo P o también llamado controlador proporcional.
- Se observa en la Figura 24 que el sistema tiene una respuesta lineal hasta llegar al nivel de referencia pre programado. Acciona la bomba a su máxima potencia para luego permanecer apagado al llegar al nivel de referencia, consiguiendo un sistema totalmente automatizado.

- El uso de herramientas computacionales como MATLAB y las tarjetas electrónicas de desarrollo como ARDUINO UNO junto a sensores y actuadores compatibles logran facilitar la implementación de diseños teóricos de controladores digitales a bajo costo, esto ayuda en la comprensión en los estudiantes de los fundamentos de la teoría de sistemas de control.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a estudiantes de la carrera de Ingeniería Biomédica que cursaron la asignatura de SISTEMAS DE CONTROL: Sabrina Montaña Camargo, Claudia Rodríguez Canaviri, Alison Carmen Estrada Carpio, Pablo Vargas Rosas y Valeria Fabiana Toro Vargas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dorf, R. C. & Bishop, R. H. (2011). *Modern Control Systems*. Estados Unidos de América. Prentice Hall.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control Moderna*. Madrid, ESPAÑA. Pearson Educación, S.A.
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. México. Pearson Educación, S.A.
- Fadali, S. M. & Visioli, A. (2013). *Digital control engineering: analysis and design*. Academic Press is an imprint of Elsevier. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA
- Dorf, R. C. & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno*. Madrid, España. Pearson Educación, S.A.
- Hansontec (2020). Water Pump. Handsontec. Recuperado de: https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/Water-Pump.pdf
- Elecrow (2020). 6-12V R385 DC Diaphragm Pumps, Elecrow. Recuperado de <https://www.elecrow.com/6-12v-r385-dc-diaphragm-pumps.html>
- Neamen, D. A. (2009). *Microelectronics Circuit Analysis and Design*. New York, NY.: McGraw-Hill.
- On Semiconductor. (2020). TIP120/TIP121/TIP122 NPN Epitaxial Darlington Transistor. On Semiconductor. Recuperado de <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP122-D.PDF>
- Starware. (2020). Sensor ultrasónico arduino HC-SR04 distancia robotica. Starware. Recuperado de <https://tienda.starware.com.ar/producto/sensor-ultrasonico-arduino-hc-sr04-distancia-robotica/>
- Cabral, E. A. V. (1999). *Caracterización de reflectores e irregularidades superficiales por ultrasonidos en aire*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- MPJA. (2020). HC-SR04 User Guide. Marlin P. Jones & Assoc. Recuperado de https://www.mpja.com/download/hc-sr04_ultrasonic_module_user_guidejohn.pdf
- Veloni, A., & Miridakis, N. (2017). *Digital control systems: theoretical problems and simulation tools*: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315168630>

Derechos de Autor (c) 2020 Elías Prudencio Chavez Jaldin; Edgar Roberto Ramos Silvestre; Alison Carmen Estrada Carpio; Pablo Vargas Rosas.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)