

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

# MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE NIVEL

Dubenis Andrea López López

Jhon Anderson Gómez Pemberty


Ingeniería Mecatrónica

Director del trabajo de grado

**Wimar Alberto Moreno Silva**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**24 de mayo del 2017**


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El presente trabajo de grado fue desarrollado en la modalidad de producto obtenido en talleres o laboratorios del ITM con el objetivo de facilitar la labor docente y el trabajo experimental de los estudiantes respecto a la asignatura “Sistemas automáticos de control” en la carrera Ingeniería mecatrónica. El módulo sobre el cual se implementó el control fue una planta de control de nivel, con una configuración donde el caudal de entrada de la planta es fijo y se controla el porcentaje de apertura de la válvula de salida, para obtener la función de transferencia se adquirieron los datos de la planta física y con estos se construyó una base de datos del comportamiento de la planta ante una perturbación tipo escalón, con esta base de datos construimos, por medio del software Excel, la ecuación que representa la respuesta de la planta, es decir su función de transferencia; luego de obtener la función de transferencia se usó el software MatLAB para conseguir las constantes del controlador PID que se implementó en el trabajo; finalmente fueron ajustadas las constantes del controlador considerando la respuesta real de la planta física y las constantes entregadas por el software, logrando un tiempo de estabilización de aproximadamente 60 segundos. El producto de laboratorio a entregar cuenta con su respectivo manual de usuario para el correcto uso de la planta, la instalación de software necesario para el uso de las aplicaciones e igualmente cuenta con la guía de uso de éstas. El producto además se entrega con 3 guías propuestas para el trabajo independiente de los estudiantes.


*Palabras clave:* Control PID, nivel de tanques, producto de laboratorio, MatLAB.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

Agradecemos primeramente a nuestras familias por su incondicional soporte y dedicación durante nuestra carrera brindándonos no sólo consejos, sino también inculcándonos el amor por la academia.

A todos nuestros maestros por compartirnos sus conocimientos y procurar que fuéramos excelentes profesionales y más importante aún que fuéramos mejores personas. A nuestros amigos y compañeros que con su apoyo y estima también hicieron posible culminar este proceso de conocimiento, que si bien es el más reciente, no será el último.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

## ACRÓNIMOS

---

Estos son los acrónimos encontrados a lo largo de este trabajo.

**3D:** Tridimensional


**CAD:** Diseño asistido por computadora.

**P:** Controlador proporcional.

**PD:** Controlador derivativo.


**PI:** Controlador integral.

**PID:** Controlador proporcional – integral - derivativo.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 Generalidades.....	6
1.2 Objetivo general.....	6
1.2.1 Objetivos específicos.....	6
1.3 Organización del trabajo .....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 Sistemas de nivel de liquido .....	8
2.2 Sensor de distancia.....	9
2.3 Servo-válvula .....	9
2.4 Arduino .....	9
2.5 Bomba .....	10
3. METODOLOGÍA .....	11
3.1 Método de construcción del sistema .....	11
3.1.1 Sensores y actuadores del sistema.....	11
3.2 Adquisición de constantes del controlador .....	16
3.2.1 Ajuste de ganancias del controlador.....	17
3.3 Interfaz grafica .....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO... 20	
Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	21
REFERENCIAS .....	22
APÉNDICE .....	23
Apéndice A. Base de datos de la planta .....	23

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

El presente trabajo de grado nace al observar la necesidad de desarrollar módulos que facilitaran la aplicación de los conocimientos adquiridos en la asignatura de “Sistemas automáticos de control”, es por ello que en este proyecto se diseñó un módulo de control de nivel con enfoque didáctico, el cual consta de 2 tanques de los cuales se controla el caudal de salida de uno de ellos con el propósito de mantener el nivel de líquido en éste, el otro tanque es para el almacenamiento de agua, la función de transferencia del sistema es obtenida a partir de datos de la planta ante una perturbación tipo escalón, con esta función y la ayuda del software MatLAB hallamos las constantes de un controlador capaz de llevar y mantener la planta en su punto de equilibrio.


El módulo cuenta además con 2 aplicaciones de software, desarrolladas en el programa LabVIEW, para el control de la planta, los cuales permiten no sólo resolver las guías de trabajo independiente sugeridas, sino también visualizar el estado real de la planta mientras se trabaja en ella.

## 1.2 Objetivo general

Desarrollar un módulo de nivel de líquido que permita aplicar los conocimientos de teoría de control y desarrollar diversas estrategias de control.


### 1.2.1 Objetivos específicos

- Permitir que el módulo tenga la capacidad de implementar controladores P, PI, PD y PID
- Diseñar una interface gráfica que permita visualizar el estado de la planta en tiempo real, y modificar los parámetros de los diversos controladores.
- Desarrollar un manual de usuario para el correcto uso del módulo, así como 3 guías de trabajo independiente.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### **1.3 Organización del trabajo**

El presente trabajo se encuentra dividido en 5 secciones principales en las cuales se describen los procesos de construcción y puesta a punto del producto a entregar; la primera de estas secciones muestra la introducción al trabajo y se expone el por qué es necesario desarrollar este producto de laboratorio. En la segunda sección se plantea el marco teórico del trabajo, en el cual se describen los conceptos necesarios para comprender en un nivel básico de conocimiento, el proceso de construcción y cálculos del producto. En la tercera sección se exhibe la metodología empleada en el cálculo de las constantes del controlador y los pasos que se siguieron desde su planteamiento como idea, hasta su puesta a punto. La cuarta sección muestra los resultados obtenidos luego de la puesta a punto del producto. Finalmente, en la quinta sección se presentan las conclusiones del producto de laboratorio y adicionalmente se proponen recomendaciones y trabajos futuros para la optimización del módulo diseñado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Sistemas de nivel de líquido

Un sistema de nivel de líquido busca mantener un nivel estable de líquido por medio de controlar el caudal de entrada o salida de un depósito de líquido; éstos sistemas pueden verse representados por 2 tipos de ecuaciones diferenciales dependiendo de si el flujo de líquido es laminar o no, es decir, si el flujo de líquido presenta o no perturbaciones, para esto se usa una magnitud llamada “número de Reynolds”, si el número de Reynolds es menor a 2000 el líquido no presenta turbulencias por lo tanto es considerado laminar y la ecuación diferencial que puede representar el sistema es lineal, si el número de Reynolds es superior a 2000 el flujo se considera no laminar y para este caso el sistema es necesariamente representado por una ecuación diferencial no lineal (Ogata,1998). En este producto se trabajó bajo la suposición de un número de Reynolds menor a 2000 debido al bajo caudal de salida de la bomba empleada y a la configuración física de los tanques.

Existen diversas configuraciones de sistemas de nivel de líquido, en las que se puede controlar un número finito de ellos (Ogata,1998). El presente trabajo se desarrolló con una configuración de un 1 sólo tanque (Ver Figura 1), al cual se le controla el caudal de salida según el porcentaje de apertura de la válvula del sistema.

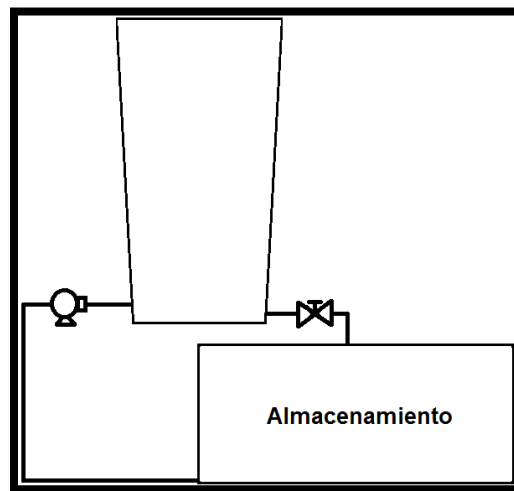



Figura 1 - Configuración esquemática de la planta. Tomado de: Elaboración propia.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.2 Sensor de distancia

Un sensor de distancia puede tener diversas arquitecturas, pero sin importar ésta todos entregan una señal electrónica en voltaje o corriente dependiendo de la distancia a la cual se encuentra un objeto del sensor. Debido a que un sensor de distancia infrarrojo presenta inconvenientes al medir sobre el agua y uno magnético es mucho más costoso, el sensor usado para esta aplicación fue un sensor de distancia ultrasónico HC-SR04 (Ver Figura 7).

## 2.3 Servo-válvula


Una servo-válvula es un tipo de válvula direccional que permite controlar el porcentaje de apertura de la válvula y así modificar la cantidad y dirección del fluido, a diferencia de una válvula ON-OFF común. Debido a que la mayoría de las servo-válvulas del mercado son usadas en aplicaciones industriales (Ver Figura 2), éstas son muy costosas y con características que sobrepasan las presiones y los caudales que se pretenden con este trabajo, es por esta razón que para la presente aplicación se creó una servo-válvula acoplando un servomotor MG996R a una válvula de bola.



Figura 2 – Servo-válvula de tipo industrial. Tomado de: <https://goo.gl/yqHP1A>

## 2.4 Arduino

Un Arduino es un sistema embebido de código abierto (Barrett,2013). Este sistema cuenta con una amplia variedad de arquitecturas de diseño, sin embargo, todas poseen una cantidad de entradas y salidas análogas y digitales, esta cantidad depende de la arquitectura del Arduino. En este proyecto es usado un Arduino UNO (Ver Figura 3) a modo de tarjeta de adquisición de datos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

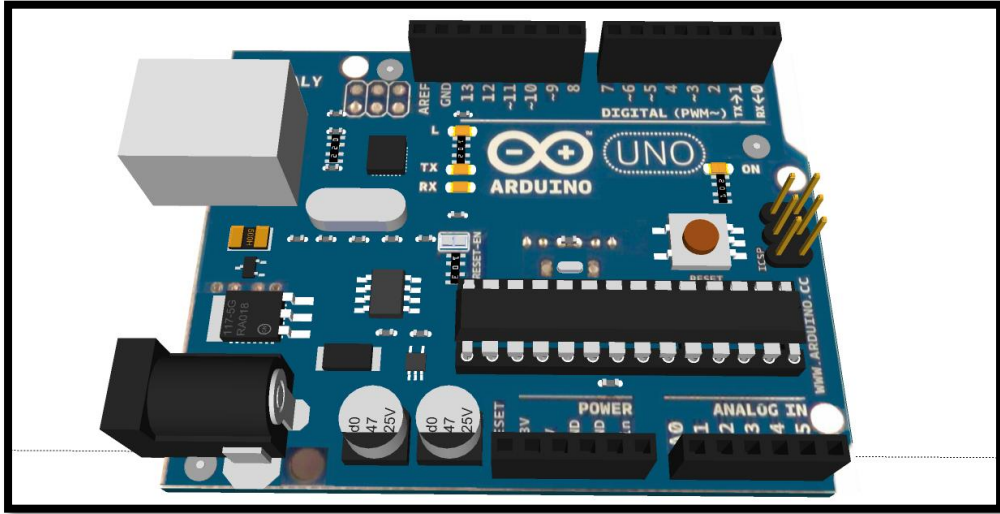


Figura 3 – Tarjeta Arduino Uno. Tomado de: <https://goo.gl/02Wztz>

## 2.5 Bomba

Las bombas hidráulicas convierten la energía mecánica entregada por un motor y un sistema mecánico, a energía hidráulica (Creus,2012). La bomba utilizada en este trabajo es una bomba de desplazamiento volumétrico con mecanismo de engranajes rectos (Ver Figura 4).

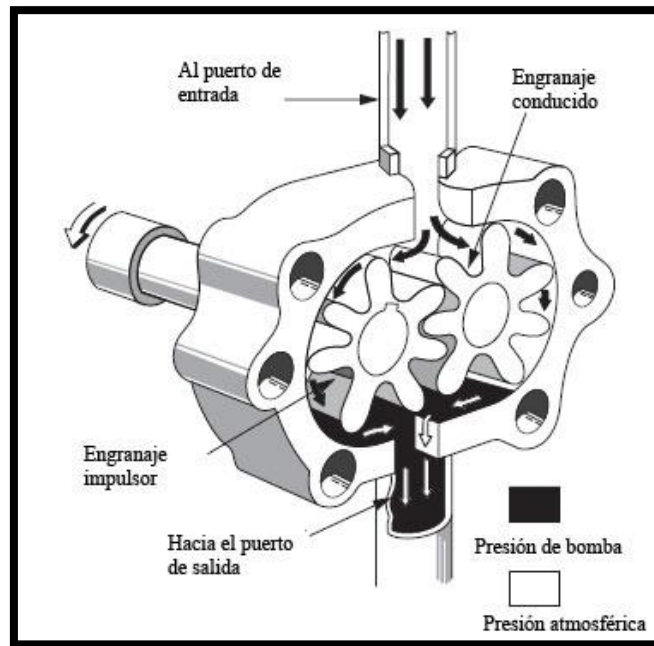



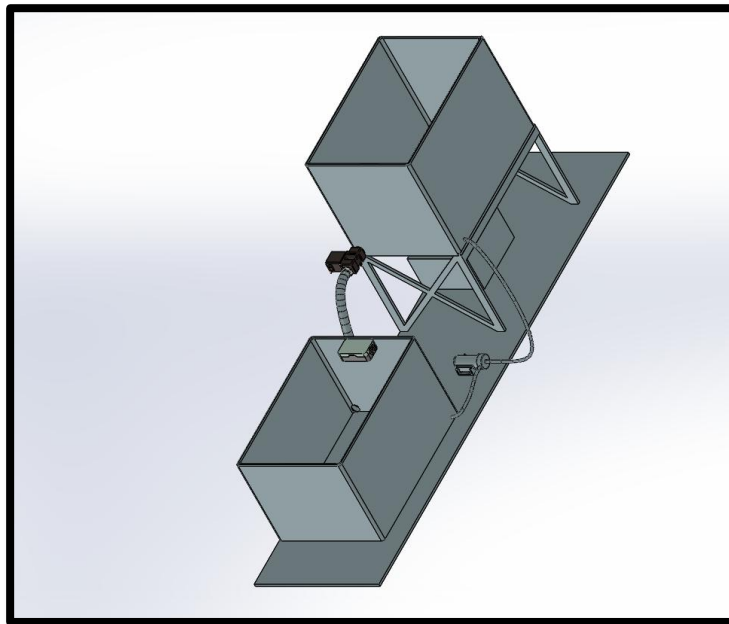
Figura 4 – Bomba de engranajes rectos. Tomado de: <https://goo.gl/DrA3NF>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. METODOLOGÍA

---

Para la construcción del sistema se creó un modelo 3D de la planta buscando que fuera lo más aproximado al real esperado (Ver Figura 5), para el desarrollo de este modelo se usó un programa CAD.



*Figura 5 - CAD de la planta. Tomado de: Elaboración propia.*

#### 3.1 Método de construcción del sistema

Para la implementación física de la planta, se realizó un diseño CAD, en el cual se consideró la mejor ubicación tanto de los actuadores como de los sensores, buscando que la configuración implementada permitiese el uso de los diferentes tipos de controles inicialmente planteados. Posteriormente con base en este CAD se desarrolló la planta real (Ver Figura 6), en la cual se realizaron algunos cambios para optimizar el espacio.

##### 3.1.1 Sensores y actuadores del sistema

Para el sistema se utilizó un sólo sensor y dos actuadores exhibidos en las figuras (7), (8) y (9) respectivamente; estos dispositivos fueron seleccionados por su precisión, resolución, costo y rango de operación, considerando también su disponibilidad en el mercado.


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 6 – Planta física construida. Tomado de: Elaboración propia.

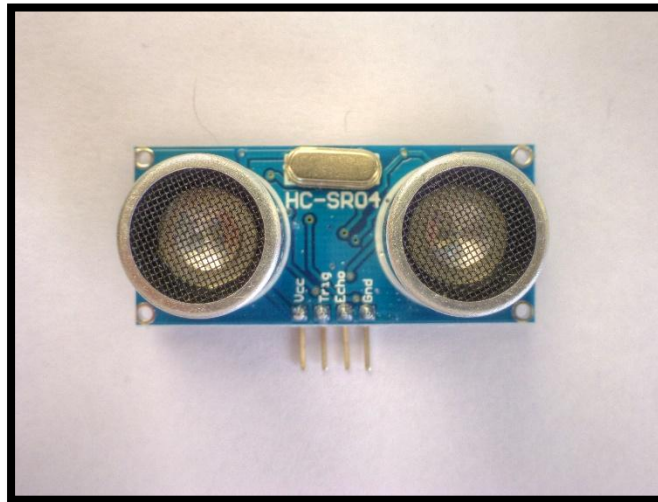


Figura 7 - Sensor Ultrasónico HC-SR04. Tomado de: <https://goo.gl/HMx9kk>


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 8 - Servomotor MG 996R. Tomado de: <https://goo.gl/4Cg3UF>



Figura 9 - Mini bomba de agua. Tomado de: <https://goo.gl/4sxbVo>



 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 1. Características de los sensores y actuadores.

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Sensor ultrasónico HC-SR04</b>	<p>Salida digital</p> <p>Dimensiones: 45 mm x 20 mm x 15 mm</p> <p>Rango de distancia: 2 cm a 400 cm aprox.</p> <p>Resolución: 3 mm</p> <p>Frecuencia central: 40 kHz</p> <p>Angulo efectivo: &lt; 15°</p> <p>Angulo de medición: 30°</p> <p>Voltaje de alimentación: 5 V DC</p> <p>Corriente en reposo: &lt; 2 mA</p> <p>Corriente en operación: 15 mA</p>
<b>Servomotor MG 996R</b>	<p>Engranajes del metal</p> <p>Dimensiones: 40 mm x 19 mm x 43 mm</p> <p>Peso: 55 g</p> <p>Velocidad de funcionamiento: 0.17sec / 60 grados (4.8V sin carga)</p> <p>Velocidad de funcionamiento: 0.13sec / 60 grados (6.0V sin carga)</p> <p>Puesto par: 9 kg-cm (4.8V)</p> <p>Puesto de par: 12 kg-cm (6V)</p> <p>Voltaje: 4,8 - 7.2Volts</p> <p>Angulo: 180 grados</p>
<b>Mini bomba de agua</b>	<p>Voltaje de operación: 3v-9v</p> <p>Corriente: 0.36A (sin carga)</p> <p>Velocidad: 12500RPM (sin carga)</p> <p>Capacidad: 2.5L/Min</p> <p>Diámetro de salida: 4mm</p> <p>Material: metal y plástico</p>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

***Sensor ultrasónico HC-SR04:***

**Ventajas**

- Bajo costo.
- Salida de señal digital.
- Alta resolución de trabajo.
- Bajo consumo energético, máximo de 15 mA.

**Desventajas**

- Gran sensibilidad al ruido, lo que genera errores en la medida.

***Servomotor MG 996R:***

**Ventajas**

- Alto torque de trabajo.
- Costo asequible.
- Ligero.

**Desventajas**

- Resolución de trabajo Media.


***Mini bomba de agua:***

**Ventajas**

- Bajo costo.
- Elevado flujo de líquido, 2.5L/Min.
- Tamaño reducido.

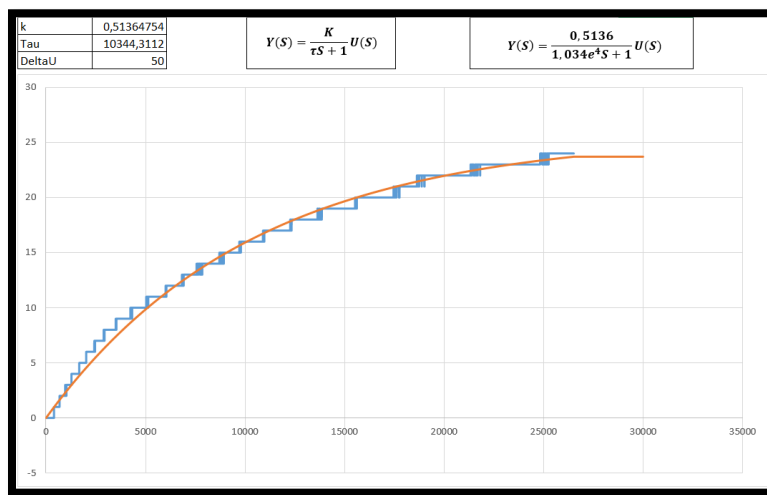
**Desventajas**

- Ruido elevado.
- Baja disipación de calor.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3.2 Adquisición de constantes del controlador

Para obtener las constantes del controlador de la planta, es preciso excitar el sistema por medio de una función escalón y conocer la respuesta a esta excitación (Flores,2013). Por lo tanto, inicialmente se generó la función de transferencia de la planta por medio del software Excel, con este fin se exportaron los datos de la respuesta de la planta ante la perturbación antes mencionada, posteriormente con estos datos (Ver Apéndice A), se obtuvo la gráfica 1, con la cual se logró obtener la función de transferencia de la planta. Una vez obtenida la FT se calcularon en MatLAB las constantes del controlador PID (Ver Figura 10).



Gráfica 1 – Función de transferencia de la planta bajo método experimental. Tomado de: Elaboración propia.

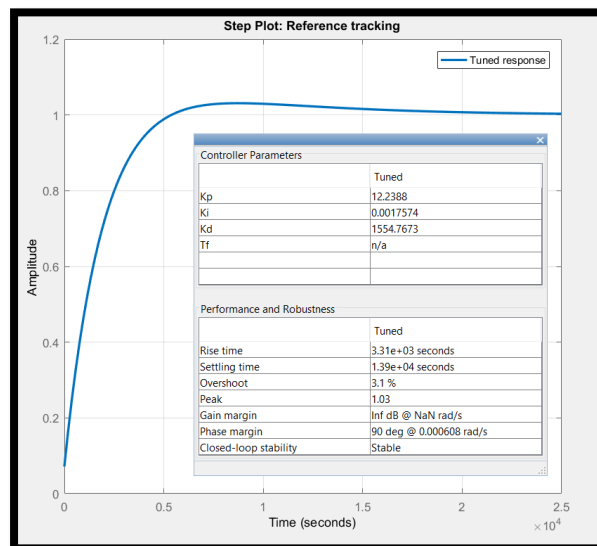



Figura 10 – Constantes del controlador PID obtenidas de MatLAB. Tomado de: Elaboración propia.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	<b>Código</b>	FDE 089
		<b>Versión</b>	03
		<b>Fecha</b>	2015-01-22

### 3.2.1 Ajuste de ganancias del controlador

Dado que los resultados que entrega el software son cálculos ideales, a estas constantes se les realizó un ajuste ya en funcionamiento sobre la planta para alcanzar la estabilidad del sistema. En la tabla 2 se muestran las constantes luego de realizarles el ajuste experimental.

Tabla 2 – Constantes ajustadas del controlador PID. Tomado de: Elaboración propia.

<i>Constante del controlador PID</i>	<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
	10	7,5	13,8

### 3.3 Interfaz grafica

Para el diseño de las dos interfaces graficas (ver Figura 11 y 12) se usó el entorno de programación visual LabView.

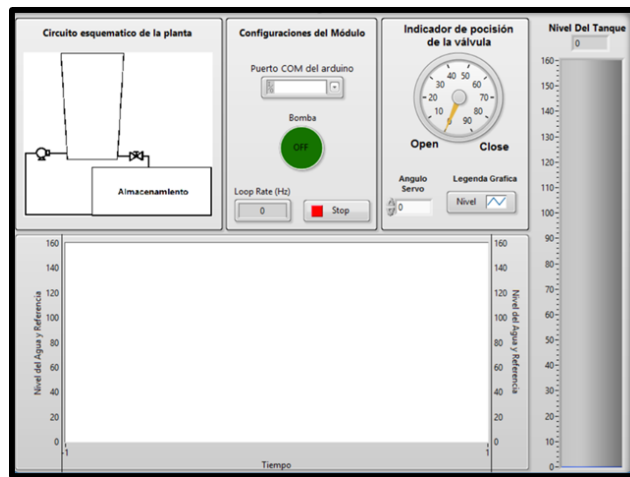


Figura 11 – Interfaz gráfica 1. Tomado de: Elaboración propia.

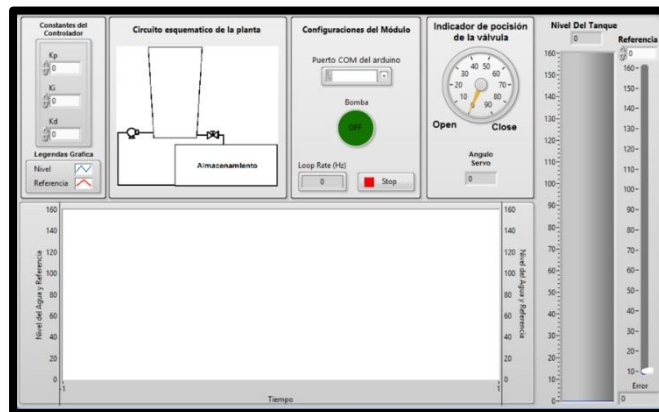



Figura 12 – Interfaz gráfica 2. Tomado de: Elaboración propia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos luego de finalizar el producto de laboratorio, en la figura 13 podemos observar el módulo una vez finalizada su construcción, y en la figura 14 podemos visualizar los accesorios necesarios para el funcionamiento de la planta, los cuales fueron entregados al Laboratorio Mecatrónica del ITM (G-307).

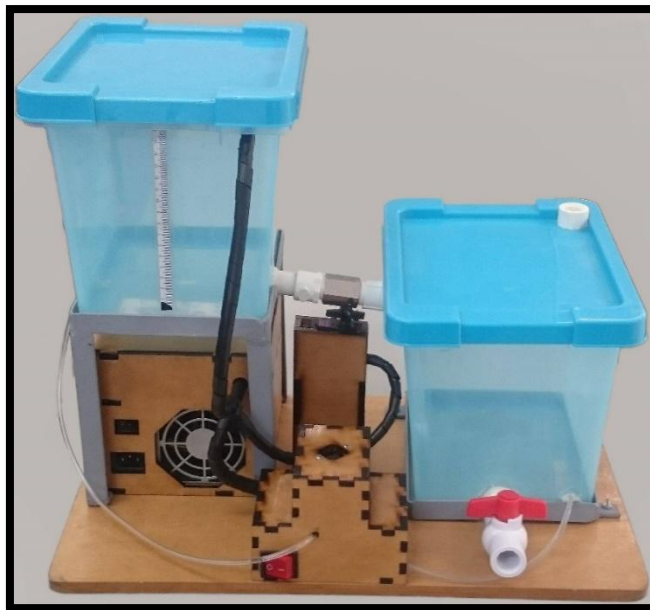


Figura 13 – Módulo didáctico de control de nivel. Tomado de: Elaboración propia.

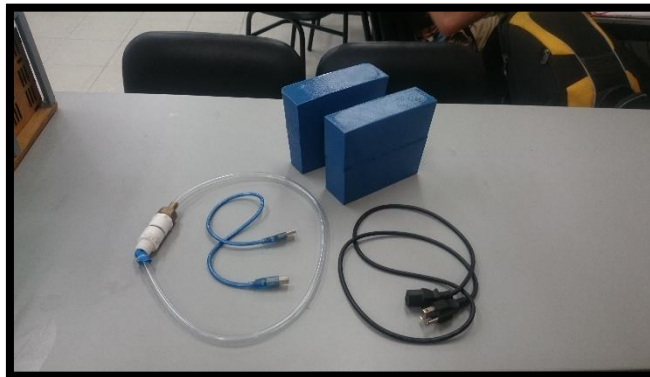



Figura 14 – Accesorios del Módulo didáctico de control de nivel. Tomado de: Elaboración propia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la figura 15 podemos observar el comportamiento final de la planta implementando las constantes del controlador que se encuentran en la tabla 2 (Ver Figura 12). En esta figura observamos el comportamiento del nivel del agua, en azul, respecto al punto de referencia, en rojo; cómo podemos ver, una vez alcanzada la referencia la planta mantiene el nivel del agua, sin embargo, notamos ciertas perturbaciones, éstas se deben a que aún con el filtrado del sensor ultrasónico genera en el sistema cierta inestabilidad (Ver Figura 16), esto debido a la limitación de encontrar un sensor, no industrial, de mayor precisión.

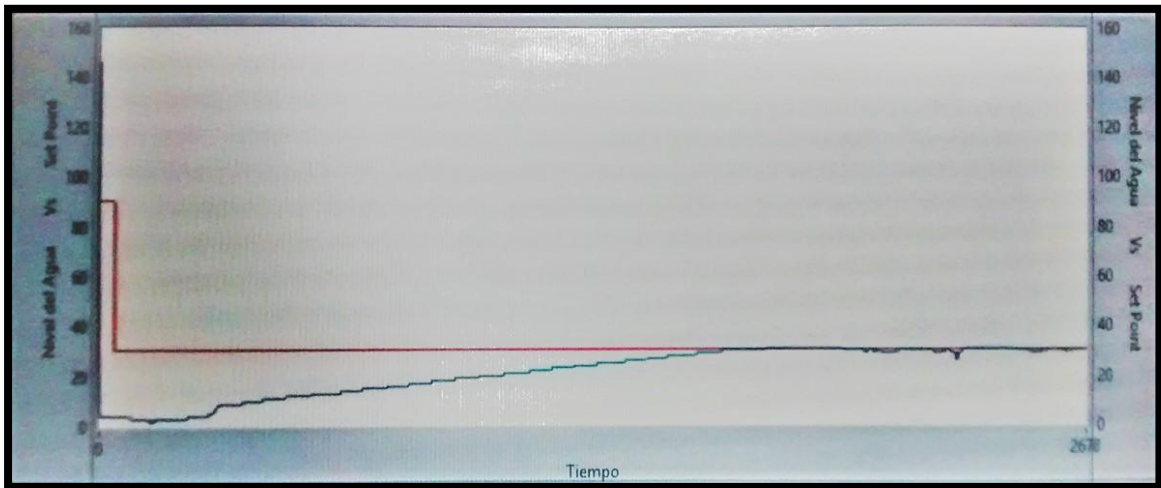


Figura 15 – Comportamiento del Módulo didáctico de control de nivel. Tomado de: Elaboración propia.

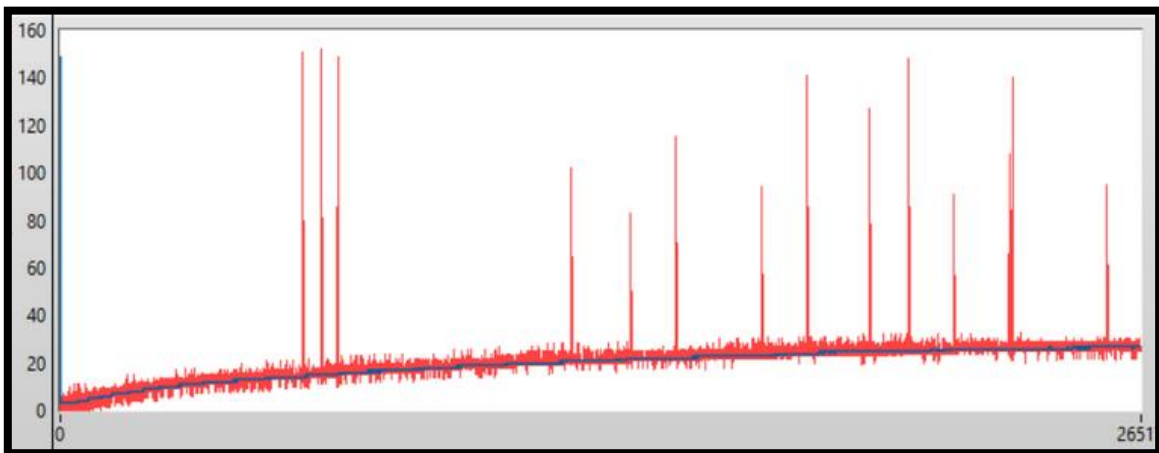



Figura 16 – Comparación de la señal de sensor ultrasónico con (En azul) y sin (En rojo) filtrado.


Tomado de: Elaboración propia

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- Se logra la puesta a punto de una planta de control de nivel que permite aplicar los conocimientos teóricos de sistemas automáticos de control.
- El producto logra por medio de sus interfaces graficas la implementación de diversos tipos de controladores.
- Las interfaces graficas diseñadas permiten visualizar y modificar en tiempo real los parámetros de la planta, permitiendo cambiar el tipo de controlador sin necesidad de detener el funcionamiento del módulo.
- Se proponen tres guías de trabajo independiente y un manual de usuario con recomendaciones sobre el uso del producto, facilitando la labor docente y el uso adecuado del módulo.
- Se analiza que los valores de las constantes de los controladores deben ser ajustadas con base en la planta física, con el propósito de permitir el correcto funcionamiento de ésta, debido a la gran cantidad que intervienen en el sistema.
- Se concluye que debe realizarse un filtrado de la señal del sensor de distancia usado, debido a la gran cantidad de perturbaciones que éste posee, por presencia de ruido producido por el funcionamiento de la bomba y del PWM usado en el servomotor de la servo-válvula.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### Recomendaciones y Trabajos Futuros

Se recomienda adquirir un sensor de distancia de alta precisión con características similares a las que ofrece el sensor LSP 05x que se muestra en la figura 17.




*Figura 17 – Sensor LSP 05x. Tomado de: <https://goo.gl/QIaBkl>*

Es recomendable también mejorar el filtrado de la planta, implementando filtros físicos y opto-acopladores para reducir a un mínimo posible los ruidos.

Se recomienda cambiar la bomba de la planta, por una más silenciosa y de mayor caudal de salida, permitiendo mayor velocidad en la planta. Es igualmente aconsejable, en caso de cambiar la bomba, reemplazar el servomotor y el diámetro de salida de la tubería de la planta debido que en la configuración actual del módulo, es aconsejable que el caudal máximo de salida sea mayor o mínimamente igual al de entrada, para evitar la saturación de la salida y que el tanque se desborde.


Como trabajos a futuro, se propone:

- El cambio de la bomba del sistema.
- Adquisición de un sensor de distancia de alta precisión y un rango mínimo de 30mm.
- Cambiar los tanques para mejorar el tiempo de respuesta de la planta.
- Añadir un tercer tanque, más pequeño, entre la bomba y el tanque a controlar, para minimizar las perturbaciones del líquido.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

- 
- [1] Agustín, F. (2013). Obtención de la función de transferencia del sistema mediante la identificación paramétrica a partir de los datos experimentales. Instituto Tecnológico de Mérida.
- [2] Barrett, S. F. (2013). Arduino Microcontroller Processing for Everyone!. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems, 8(4), 1-513.
- [3] Katsuhiko, O. (1998). Ingeniería de control moderna. Editorial Prentice Hall.
- [4] Solé, A. C. (2012). Neumática e hidráulica. Marcombo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

## APÉNDICE


---

### Apéndice A. Base de datos de la planta

El código QR que se aprecia en la figura 18, dirige al link del archivo de Excel donde se encuentra la base de datos usada para calcular la función de transferencia de la planta.



Figura 18 – Código QR base de datos. Tomado de: Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Jhon Anderson Gómez

[Signature]

FIRMA ASESOR [Signature]

FECHA ENTREGA: Mayo 9/2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_\_\_     
 ACEPTADO      
 ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_