



1859

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS  
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## TÍTULO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
TANQUES ACOPLADOS PARA LA MEDICIÓN Y  
CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL DE LÍQUIDOS

*TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR POR EL  
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO*

**AUTOR:** Francisco Javier Castillo Ojeda

**DIRECTOR:** Ing. Julio César Cuenca Tinitana, Mg. Sc.

LOJA - ECUADOR

2014

## CERTIFICACIÓN

Ing. Julio César Cuenca Tinitana, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

### CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“Diseño y Construcción de un Sistema de Tanques Acoplados para la Medición y Control Automático de Nivel de Líquidos”**, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el señor egresado: **Francisco Javier Castillo Ojeda**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 9 de Junio de 2014



Ing. Julio César Cuenca Tinitana, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

## **AUTORÍA**

Yo Francisco Javier Castillo Ojeda declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

**Autor:** Francisco Javier Castillo Ojeda

**Firma:**..........

**Cédula:** 1104734049

**Fecha:** 12 de Junio de 2014

## **CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo Francisco Javier Castillo Ojeda, declaro ser el autor de la tesis titulada: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL DE LÍQUIDOS, como requisito para optar al grado de Ingeniero Electromecánico; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja par que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, en las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, doce días del mes de Junio del dos mil catorce.

Firma:  .....

**Autor:** Francisco Javier Castillo Ojeda

**Cédula:** 1104734049

**Dirección:** Av. De los Paltas Y Bulgaria esquina.

**Correo Electrónico:** franciscojcastillo@gmail.com.

**Teléfono:** 2107936

**Celular:** 0984166575

### **DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director de Tesis:** Ing. Julio César Cuenca Tinitana, Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. Gonzalo Ramiro Riofrío Cruz, Mg. Sc.

Ing. Jorge Enrique Carrión González, Mg. Sc.

Ing. Carlos Raúl Barreto Calle, Mg.Sc.

## **PENSAMIENTO**

"El desarrollo del hombre depende fundamentalmente de la invención. Este es el producto más importante de su cerebro creativo"

Nikola Tesla (1856-1943).

## **DEDICATORIA**

Este proyecto lo dedico a una sola persona, quien durante toda mi vida me ha dado su apoyo incondicional, me ha ayudado siempre a levantar de mis caídas y errores y ha sido siempre la primera en celebrar mis logros.

Gracias Mamita.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia por su apoyo y atención.

Al Ingeniero Julio Cuenca por haberme guiado en este proyecto cuando me encontraba con dudas sobre cómo llevarlo a cabo.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Electromecánica que supieron motivarnos a seguir adelante con nuestras metas.

A Fernando Iñiguez por la ayuda en el diseño y carpintería de este proyecto.

A mis amigos que siempre han sabido traer alegría a mi vida cuando lo he necesitado.

Al Viejo Minero el punto de encuentro de grandes amigos.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>A.-TÍTULO</b> .....	<b>1</b>
<b>B. RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>C.- INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>D.- REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>D.1 CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL DE NIVEL</b> .....	<b>5</b>
D.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS .....	5
<i>d.1.1.1 ¿Qué es el control automático?</i> .....	5
<i>d.1.1.2 Autorregulación</i> .....	5
<i>d.1.1.3 Terminología del control automático</i> .....	5
D.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	6
<i>d.1.2.1 Control de Lazo Abierto</i> .....	6
<i>d.1.2.2 Control de Lazo Cerrado</i> .....	7
D.1.3 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROL DE NIVEL .....	8
<i>d.1.3.1 Medición de nivel mediante sensores capacitivos</i> .....	8
<i>d.1.3.2 Medición de nivel mediante sensores ultrasónicos</i> .....	10
<i>d.1.3.3 Sensor Ultrasónico HC-SR04</i> .....	11
<i>d.1.3.4 Electroválvulas</i> .....	12
D.1.4 HARDWARE Y SOFTWARE DE CONTROL .....	14
<i>d.1.4.1 Adquisición de Datos</i> .....	14
<i>d.1.4.3 Tarjeta Arduino</i> .....	18
<i>d.1.4.4 LabVIEW</i> .....	21
<i>d.1.4.5 MATLAB</i> .....	24
<b>D.2 CAPÍTULO II: MODELAMIENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS</b> .....	<b>28</b>
D.2.1 CLASIFICACIONES DE LOS MODELOS .....	28
<i>d.2.1.1 Según la información de entrada</i> .....	29
<i>d.2.1.2 Según el tipo de representación</i> .....	29
<i>d.2.1.3 Según la aleatoriedad</i> .....	30
<i>d.2.1.4 Clasificación según su aplicación u objetivo</i> .....	30
D.2.2 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	31
<i>d.2.2.1 Identificación de analítica</i> .....	31
<i>d.2.2.2 Identificación recursiva</i> .....	31
<i>d.2.2.3 Identificación Experimental mediante Señales Especiales</i> .....	31
<i>d.2.2.4 Procedimiento Experimental:</i> .....	35
<b>D.2.3 CONTROL PID</b> .....	<b>35</b>
<i>d.2.3.1 Acción proporcional</i> .....	35
<i>d.2.3.2 Acción Integral</i> .....	36
<i>d.2.3.3 Acción Derivativa</i> .....	37
<i>d.2.3.4 Estructuras de controladores PID</i> .....	38
<b>E. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
E.1 MATERIALES.....	40



E.2 MÉTODOS .....	41
E.2.1 PASOS A SEGUIR .....	41
E.2.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA .....	41
1. Descripción del Banco Desarrollado.....	41
2. Descripción del proceso de obtención de modelos .....	44
3. Obtención de los parámetros de control PID. ....	48
4. Implementación del control PID.....	50
<b>F.- RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
<b>F.1.MODELOS OBTENIDOS.....</b>	<b>54</b>
<input type="checkbox"/> Modelo de llenado de un solo tanque.....	54
<input type="checkbox"/> Modelo de llenado de sólo dos tanques en conexión horizontal .....	56
<input type="checkbox"/> Modelo de llenado de sólo dos tanques en conexión vertical .....	60
<input type="checkbox"/> Modelo de llenado de todos los tanques al mismo tiempo .....	62
<b>F.2.PID DESARROLLADOS .....</b>	<b>67</b>
<input type="checkbox"/> PID para un solo tanque .....	67
<input type="checkbox"/> PID para 2 tanques conectados horizontalmente .....	67
<input type="checkbox"/> PID para 2 tanques conectados verticalmente.....	68
<input type="checkbox"/> PID para todos los tanques.....	69
<b>F.3.APLICACIONES PID DESARROLLADAS EN LABVIEW .....</b>	<b>70</b>
<b>G.- DISCUSIÓN .....</b>	<b>87</b>
<b>H.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>I.- RECOMENDACIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>J.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>91</b>
<b>K. ANEXOS .....</b>	<b>92</b>

**a.-TÍTULO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TANQUES  
ACOPLADOS PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO  
DE NIVEL DE LÍQUIDOS**

## **b. RESUMEN**

Dentro de los campos que abarca la carrera de Ingeniería Electromecánica se encuentra el control automático, por ende es fundamental que los estudiantes de la UNL de esta carrera puedan realizar prácticas en esta área antes de salir al campo laboral.

El banco de pruebas construido permite la conexión del sistema de tanques acoplados a un computador por medio de una tarjeta Arduino para poder realizar procesos experimentales de medición, control y automatización del proceso de llenado de tanques conectados, de forma controlada y libre, creando situaciones similares encontradas en la industria lo que representa una ventaja para los estudiantes que se encuentren con situaciones como esta en la vida laboral.

Para comprobar el funcionamiento del banco el autor ha realizado varias pruebas de las capacidades del mismo que consisten en las siguientes partes:

1. Proceso de control manual y registro de mediciones obtenidas en Labview.
2. Obtención de los modelos matemáticos de los sistemas probados en Matlab.
3. Simulación del control PID en Simulink hasta obtener los parámetros de control más adecuados.
4. Proceso de control PID práctico en Labview.

## **b. ABSTRACT**

Within the fields covered by Electromechanical Engineering is automatic control, is therefore essential that UNL students in this career practice in this area before graduating and incorporate in the workforce.

The test bench allows connection to the tank system coupled to a computer via an Arduino card to make experimental process measurement, control and automation of filling tanks connected, creating similar situations found in the industry which is an advantage for students who later may encounter such situations in their working field.

To check the operation of the test bench the author has conducted several tests of its capabilities which consists of the following parts:

1. Process manual control and recording of measurements obtained in Labview.
2. Obtaining mathematical models in Matlab from the different tested systems.
3. Simulation in Simulink of the PID control parameters to obtain the most appropriate control.
4. Practical PID control process using Labview.

## **c.- INTRODUCCIÓN**

El control automático y la automatización son cada vez más importantes en la industria y dentro de este campo ingenieril, el saber identificar un sistema así como saber desarrollar controladores PID para lazos de control cerrados es fundamental, por ese motivo es importante que los estudiantes de la carrera de ingeniería en electromecánica tengan la oportunidad de realizar prácticas en esta área para desenvolverse de manera más adecuada en el campo laboral.

Este proyecto está enfocado al control automático de nivel de líquidos, permite a los estudiantes realizar prácticas en todos los pasos que están involucrados en la obtención de sistemas controlados automáticamente.

El banco permite al usuario realizar mediciones del nivel de agua en los tanques en procesos de control manual, para de esta manera obtener el modelo matemático del comportamiento del sistema y así proceder a realizar un controlador automático del nivel.

Para el desarrollo de este proyecto se plantearon los siguientes objetivos:

### **OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Diseñar y construir un banco pruebas para la medición y control de nivel en un proceso experimental.

#### **Objetivos específicos**

- Buscar y sistematizar información sobre: instrumentos de medición de nivel, adquisición de datos, software de automatización y control, instrumentos de automatización y control de nivel.
- Construir e implementar el banco para experimentos de control de nivel.
- Obtener el modelo matemático que describa la dinámica del proceso bajo estudio.
- Desarrollar y simular el algoritmo de control para el proceso objeto de estudio.

## **d.- REVISIÓN DE LITERATURA**

### **d.1 CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL DE NIVEL**

#### **d.1.1 Conceptos básicos**

##### **d.1.1.1 ¿Qué es el control automático?**

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que se conoce como la segunda revolución industrial. Es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado y utilizando la diferencia para proceder a reducirla, es decir crea un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

##### **d.1.1.2 Autorregulación**

La autorregulación es una reacción inherente a un proceso que ayuda al establecimiento del equilibrio o estado estacionario del mismo. Se dice que un proceso es autorregulado cuando, partiendo de una situación de equilibrio, alcanza un nuevo estado de equilibrio después de cualquier variación de carga, entendiéndose por carga la cantidad de materia y energía necesarias para mantener el equilibrio.

##### **d.1.1.3 Terminología del control automático**

###### **d.1.1.3.1 Medida.**

Una medida es un número (real, complejo, vector, etc.) que expresa la relación entre una cantidad y la unidad utilizada para medirla. El valor exacto de una medida no es posible precisarlo rigurosamente (consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg), por lo que toda medida debe ir acompañada de un valor que indique la incertidumbre o error con la que fue determinada. Si por ejemplo un termómetro marca 25 °C, y sabemos que dicho instrumento permite medir la temperatura con una aproximación de 1°C, entonces debemos expresar la medida como  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

###### **d.1.1.3.2 Medición.**

Es la determinación de una medida. Una medición puede ser realizada, por comparación (directa o indirecta), con cantidades cuyas unidades son las unidades básicas o

estándares del sistema de unidades utilizado. Para la realización de una medición se utiliza un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una cantidad o variable. Usualmente la variable medida es determinada indirectamente, mediante el efecto que produce en una variable secundaria conocida con el nombre de variable medible. Así por ejemplo, mediante la medición de la elongación de un resorte (variable medible) se determina la magnitud del peso que pende de uno de los extremos.

#### d.1.1.3.3 Instrumento o sistema de medición.

Es uno o más dispositivos de medición conectados de forma tal de poder realizar una medición completa. Un dispositivo de medición consta de uno o más elementos básicos, además de otros componentes, para conformar una unidad encargada de ejecutar una o más operaciones de medición.

#### d.1.1.3.4 Sistema de control.

Es aquel sistema en el cual el efecto deseado es logrado operando sobre una o más variables de entrada, hasta que la salida, la cual es una medida del efecto deseado, cae dentro de un rango de valores aceptables. Los instrumentos de medición son parte integral de un sistema de control, por lo que al conjunto se le suele llamar sistema de medición y control. (CALDERON Juan, 2004)

### **d.1.2 Clasificación de los sistemas de control.**

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y a lazo cerrado, esto determina la acción de control que es lo que activa al sistema para producir una salida.

#### **d.1.2.1 Control de Lazo Abierto**

Es aquel sistema de control en el cual la acción de control es independiente de la salida del sistema (Fig. 1).

Los rasgos característicos de este tipo de sistemas son:

- La habilidad para ejecutar una acción con precisión está relacionada directamente a su calibración, lo que implica establecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.

- Estos sistemas no tienen problemas de inestabilidad que suelen presentarse en los de lazo cerrado.

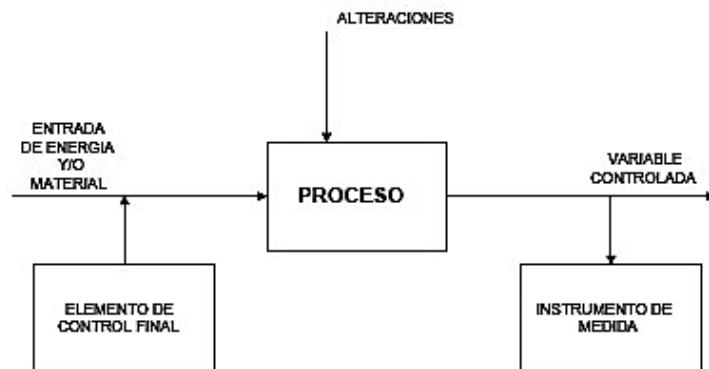


Figura 1. Lazo de Control abierto (Sapiensman)

### d.1.2.2 Control de Lazo Cerrado

Es el sistema de control en el cual la acción de control es en cierta manera dependiente de la salida del sistema (Fig.2). Estos son comúnmente llamados sistemas de control por realimentación o retroacción.

Este tipo de sistemas permite que la salida sea comparada con la entrada del sistema, de manera que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida. Se puede describir como una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema.

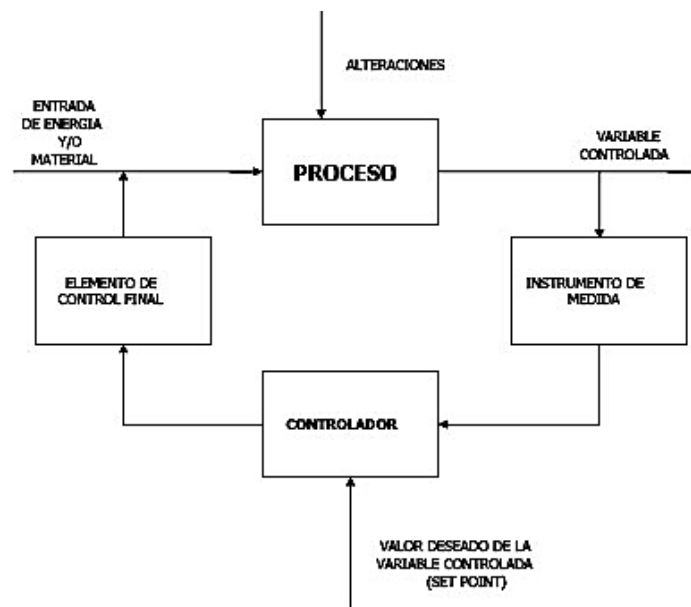


Figura 2. Lazo de Control cerrado (Sapiensman)



### d.1.3 Sistemas de Medición y Control de Nivel

#### d.1.3.1 Medición de nivel mediante sensores capacitivos

Los sensores de desplazamiento capacitivos tienen aplicaciones muy amplias, son empleados directamente para medir el desplazamiento y la posición y también como bloques de construcción en otros sensores donde los desplazamientos se producen por la fuerza, presión, temperatura, y así sucesivamente. La capacidad de los detectores capacitivos para detectar prácticamente todos los materiales los hace una opción atractiva para muchas aplicaciones.

La capacitancia de un capacitor plano es directamente proporcional a la distancia entre sus placas, por lo tanto, el principio de funcionamiento de un sensor capacitivo de nivel está basado en el cambio de capacitancia en presencia de un material conductor o dieléctrico. Cuando la capacitancia varía esta puede ser convertida en una señal eléctrica para ser medida.

Como ejemplo considerar tres placas equidistantes, cada una de las zonas A (Fig. 3a). Las placas forman dos condensadores C1 y C2. Las placas superior e inferior son alimentados con los fuera de la fase de la onda senoidal de señales, es decir, las fases de señal se desplazan 180 °. Ambos condensadores casi iguales entre sí y por lo tanto la placa central tiene casi ninguna tensión debido a las corrientes a través de C1 y C2 se anulan entre sí. Ahora, vamos a suponer que la placa central se mueve hacia abajo en una distancia x (Fig. 3b). Esto da lugar a cambios en los valores de capacitancia respectivos:

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{x_0+x} \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{x_0-x} \quad (1)$$

y los aumentos de la placa central de señal en proporción al desplazamiento y la fase de dicha señal es una indicación de la placa central de dirección arriba o abajo. La amplitud de las señales de salida es:

$$V_{out} = V_0 \left( -\frac{x}{x_0+x} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (2)$$

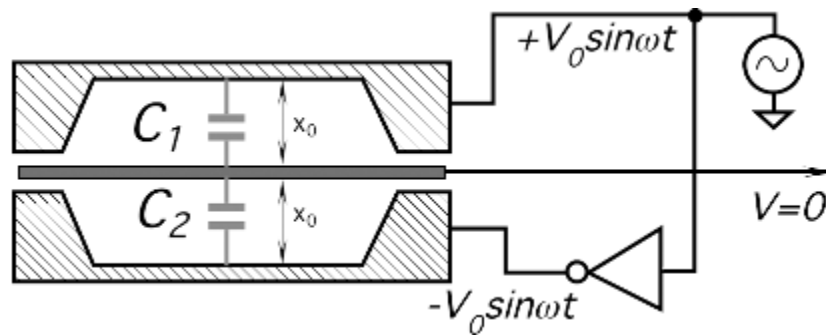


Figura 3a. Sensor Capacitivo en estado inicial

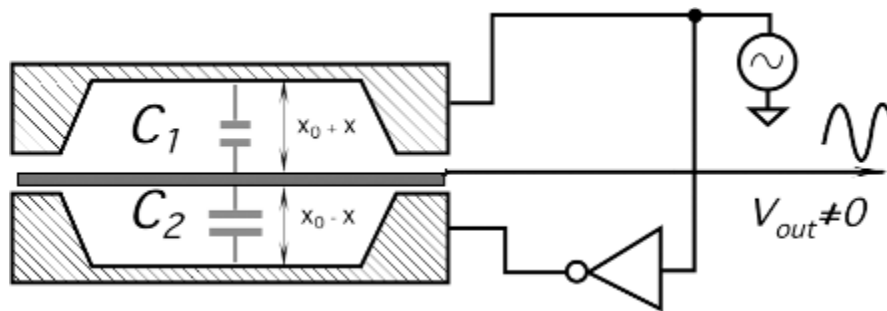


Figura 3b. Sensor capacitivo con un incremento  $x$  entre la distancia de una de las placas y la placa central (Fraden, 2004)

En muchas aplicaciones prácticas, cuando se miden distancias a un objeto eléctricamente conductor, la superficie del objeto en sí mismo puede servir como placa del condensador. El principio de funcionamiento de un sensor capacitivo monopolar consiste en una placa de un condensador está conectada al conductor central de un cable coaxial y la otra placa está formada por un objetivo (objeto). Tomando en cuenta que la placa de sonda está rodeada por un protector de tierra para minimizar un efecto de halo y mejorar la linealidad. Una sonda capacitiva típica opera a frecuencias en el rango de 3-MHz y puede detectar objetos a muy rápido movimiento, como una respuesta de frecuencia de una sonda con un interfaz electrónico integrado está en el intervalo de 40 KHz. Un sensor de proximidad capacitivo puede ser altamente eficiente cuando se usa con los objetos conductores de la electricidad. El sensor mide una capacidad entre el electrodo y el objeto. Sin embargo, incluso para los objetos no conductores, estos sensores se pueden emplear de forma eficiente, aunque con una menor precisión. Cualquier conductor o no conductor, que se pone en la proximidad del electrodo, tiene sus propias propiedades dieléctricas que alterarán la capacitancia entre el electrodo y la carcasa del sensor y, a su vez, producirá la respuesta medible. (Fraden, 2004)

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores.

En fluidos conductores el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

Se caracterizan por no tener partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza.

Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0,1 % de aumento de la constante dieléctrica por cada grado centígrado) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido puedan adherirse al electrodo variando su capacidad y falseando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores. También se usan como interruptores de nivel.

#### **d.1.3.2 Medición de nivel mediante sensores ultrasónicos**

Se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del depósito. Los sensores trabajan a una frecuencia de unos 20 KHz, estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.

Hay que evitar que existan obstáculos (por ej. espumas) en el recorrido de las ondas, aunque algunos medidores compensan los ecos fijos debidos al perfil del depósito (mediante software).

La distancia  $L_0$  al objeto se puede calcular a través de la velocidad  $v$  de las ondas ultrasónicas en el medio y el ángulo  $\theta$  (Fig. 4):

$$L_0 = \frac{vt \cos \theta}{2} \quad (3)$$

Donde  $t$  es el tiempo para que las ondas ultrasónicas viajen al objeto y de vuelta al receptor. Si un transmisor y un receptor están colocados cerca uno del otro en comparación con la distancia al objeto, entonces  $\cos \theta \approx 1$  (Fraden, 2004).

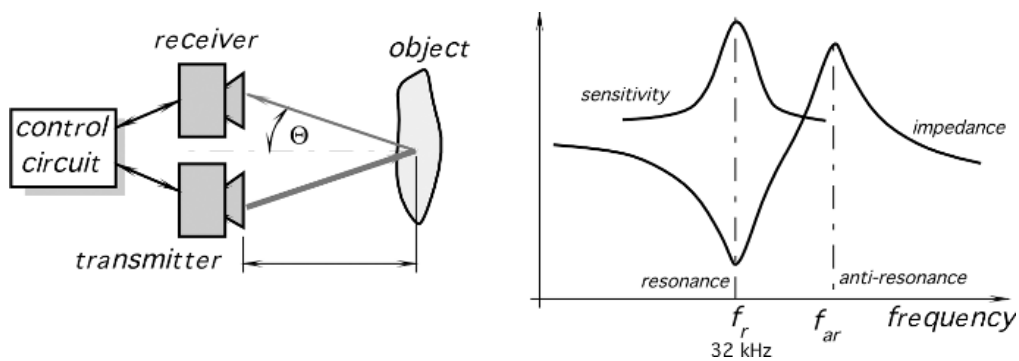


Figura 4. Principio de funcionamiento de un sensor ultrasónico (Fraden, 2004)

### d.1.3.3 Sensor Ultrasónico HC-SR04

El sensor ultrasónico HC-SR04 (Figura 5) es una de las opciones disponibles para trabajar junto con la placa Arduino y que permite determinar la proximidad de los objetos mediante ondas ultrasónicas.

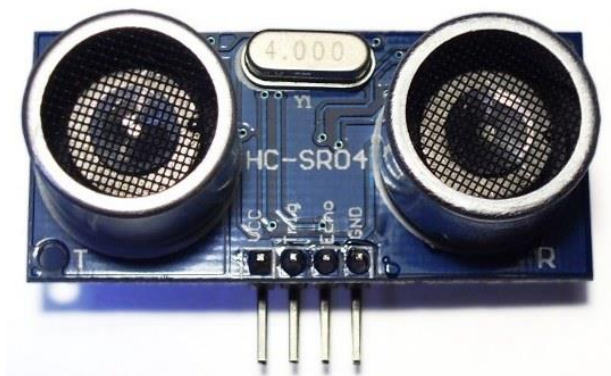


Figura 5. Sensor ultrasónico HC-SR04 (Arduino)

#### d.1.3.3.1 Características del sensor:

- Fuente de alimentación: 5 VDC
- Corriente en reposo: < 2 mA
- Corriente de trabajo: 15 mA
- Ángulo Eficaz: <math><15^\circ</math>
- Rango de medición: 2 cm - 400 cm
- Resolución: 0,3 cm

- Ángulo de medición: 30 grados
- Ancho de pulso del disparador: 10 us
- Dimensiones: 45 x 20 x 15 mm

#### d.1.3.3.2 Principio de Funcionamiento del sensor HC-SR04

El diagrama de temporización se muestra a continuación (Figura 6). Suministrando un impulso corto de 10us a la entrada de disparo para iniciar la medición y luego el módulo enviará una ráfaga de 8 ciclos de ultrasonidos a 40 kHz y que generarán un eco. El eco es un objeto de distancia que es ancho de pulso y el rango en proporción. Se puede calcular el rango a través del intervalo de tiempo entre el envío y la recepción de señal de activación de la señal de eco. Fórmula:

$$\frac{t(us)}{58} = d(cm) \quad (4)$$

Que viene de:

$$d = t * \frac{v}{2} \quad (5)$$

En donde  $d$  es la distancia en centímetros,  $t$  es el tiempo en microsegundos que el pin de eco se mantiene en alto y  $v$  es la velocidad del sonido

Es recomendable utilizar más de 60ms ciclo de medición, con el fin de evitar que la señal de disparo se mezcle con la señal de eco.

#### **d.1.3.4 Electroválvulas**

Una electroválvula es una válvula electromecánica, diseñada para controlar el flujo de un fluido a través de un conducto como puede ser una tubería. La válvula está controlada por una corriente eléctrica a través de una bobina solenoidal.

##### d.1.3.4.1 Clases y Funcionamiento

Una electroválvula tiene dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula. El solenoide convierte energía eléctrica en energía mecánica para actuar la válvula.

Existen varios tipos de electroválvulas. En algunas electroválvulas el solenoide actúa directamente sobre la válvula proporcionando toda la energía necesaria para su

movimiento. Es corriente que la válvula se mantenga cerrada por la acción de un muelle y que el solenoide la abra venciendo la fuerza del muelle. Esto quiere decir que el solenoide debe estar activado y consumiendo energía mientras la válvula deba estar abierta.

También es posible construir electroválvulas biestables que usan un solenoide para abrir la válvula y otro para cerrar o bien un solo solenoide que abre con un pulso y cierra con el siguiente.

Las electroválvulas pueden ser cerradas en reposo o normalmente cerradas lo cual quiere decir que cuando falla la alimentación eléctrica quedan cerradas o bien pueden ser del tipo abiertas en reposo o normalmente abiertas que quedan abiertas cuando no hay alimentación.

Hay electroválvulas que en lugar de abrir y cerrar lo que hacen es conmutar la entrada entre dos salidas. Este tipo de electroválvulas a menudo se usan en los sistemas de calefacción por zonas lo que permite calentar varias zonas de forma independiente utilizando una sola bomba de circulación.

En otro tipo de electroválvula el solenoide no controla la válvula directamente sino que el solenoide controla una válvula piloto secundaria y la energía para la actuación de la válvula principal la suministra la presión del propio fluido. La figura 6 muestra el funcionamiento de este tipo de válvula. En la parte superior vemos la válvula cerrada. El agua bajo presión entra por A, B es un diafragma elástico y tiene encima un muelle que le empuja hacia abajo con fuerza débil. La función de este muelle no nos interesa por ahora y lo ignoramos ya que la válvula no depende de él para mantenerse cerrada. El diafragma tiene un diminuto orificio en el centro que permite el paso de un pequeño flujo de agua. Esto hace que el agua llene la cavidad C y que la presión sea igual en ambos lados del diafragma. Mientras que la presión es igual a ambos lados, vemos que actúa en más superficie por el lado de arriba que por el de abajo por lo que presiona hacia abajo sellando la entrada. Cuanto mayor sea la presión de entrada, mayor será la fuerza con que cierra la válvula. Ahora estudiamos el conducto D. Hasta ahora estaba bloqueado por el núcleo del solenoide E al que un muelle empuja hacia abajo. Si se activa el solenoide, el núcleo sube y permite pasar el agua desde la cavidad C hacia la salida con lo cual disminuye la presión en C y el diafragma se levanta permitiendo el paso directo de agua desde la entrada A a la salida F de la válvula. Esta es la situación

representada en la parte inferior de la figura. Si se vuelve a desactivar el solenoide se vuelve a bloquear el conducto D y el muelle situado sobre el diafragma necesita muy poca fuerza para que vuelva a bajar ya que la fuerza principal la hace el propio fluido en la cavidad C. De esta explicación se deduce que este tipo de válvula depende para su funcionamiento de que haya mayor presión a la entrada que a la salida y que si se invierte esta situación entonces la válvula abre sin que el solenoide pueda controlarla.

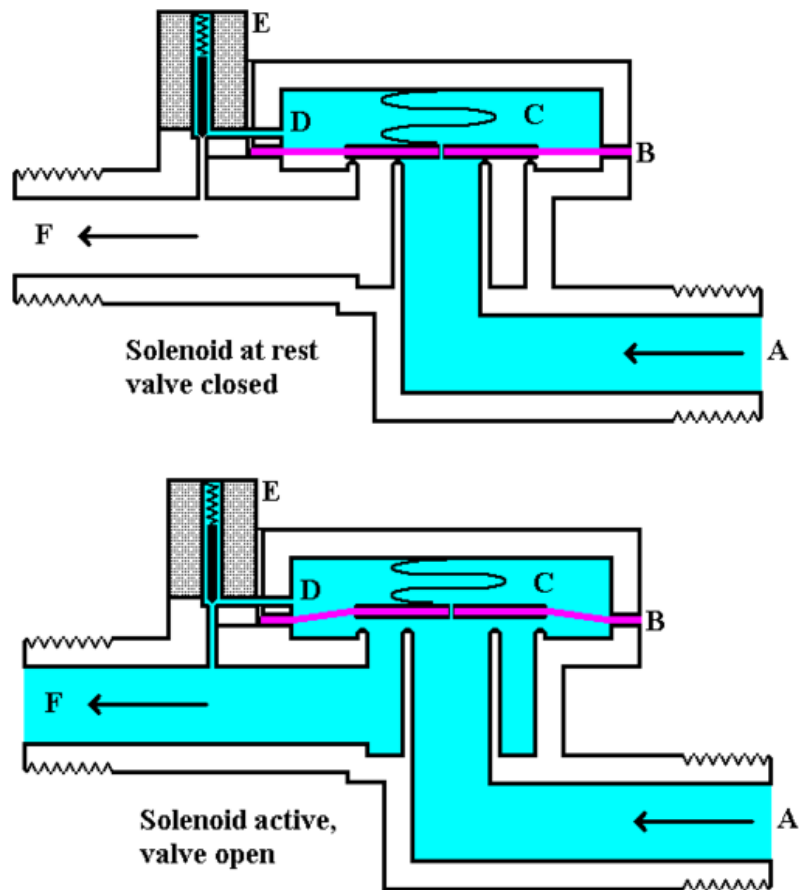


Figura 6. Electroválvula solenoide y su principio de funcionamiento A- Entrada, B- Diafragma, C- Cámara de presión, D- Conducto de vaciado de presión, E- Solenoide, F- Salida (Gonzales, 2007).

## d.1.4 Hardware y Software de Control

### d.1.4.1 Adquisición de Datos

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o PAC. Se requiere una etapa de

acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)(Figura 7).



Figura 7. Tarjeta DAQ de National Instruments (National Instruments)

#### **d.1.4.1.1 Proceso de adquisición de datos**

La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico o la propiedad física de un objeto (objeto de la investigación) que se desea medir. Esta propiedad física o fenómeno podría ser el cambio de temperatura o la temperatura de una habitación, la intensidad o intensidad del cambio de una fuente de luz, la presión dentro de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto, o muchas otras cosas. Un eficaz sistema de adquisición de datos pueden medir todos estos diferentes propiedades o fenómenos.

Un sensor es un dispositivo que convierte una propiedad física o fenómeno en una señal eléctrica correspondiente medible, tal como tensión, corriente, el cambio en los valores de resistencia o condensador, etc. La capacidad de un sistema de adquisición de datos para medir los distintos fenómenos depende de los transductores para convertir las señales de los fenómenos físicos mensurables en la adquisición de datos por hardware. Transductores son sinónimo de sensores en sistemas de DAQ. Hay transductores específicos para diferentes aplicaciones, como la medición de la temperatura, la presión, o flujo de fluidos. DAQ también despliega diversas técnicas de acondicionamiento de Señales para modificar adecuadamente diferentes señales eléctricas en tensión, que luego pueden ser digitalizados usando convertidores de entradas digitales.

Las señales pueden ser digitales (también llamada señales de la lógica) o analógicas en función del transductor utilizado. El acondicionamiento de señales suele ser necesario si la señal desde el transductor no es adecuado para la DAQ hardware que se utiliza. La señal puede ser amplificada o des-amplificada, o puede requerir de filtrado, o un cierre



patronal, en el amplificador se incluye para realizar demodulación. Varios otros ejemplos de acondicionamiento de señales podría ser el puente de conclusión, la prestación actual de tensión o excitación al sensor, el aislamiento, linealización, etc. Este pre-tratamiento de la señal normalmente lo realiza un pequeño módulo acoplado al transductor.

DAQ hardware son por lo general las interfaces entre la señal y un PC. Podría ser en forma de módulos que pueden ser conectados a la computadora de los puertos (paralelo, serie, USB, etc) o ranuras de las tarjetas conectadas a los puertos de expansión PCI ó ISA en la placa madre. Por lo general, el espacio en la parte posterior de una tarjeta PCI es demasiado pequeño para todas las conexiones necesarias, de modo que una ruptura de caja externa es obligatoria. Las tarjetas DAQ a menudo contienen múltiples componentes (multiplexores, conversores análogo a digital, conversores digital a análogo, entradas y salidas de lógica transistor a transistor, temporizadores de alta velocidad, memoria RAM). Estos son accesibles a través de un bus por un micro controlador, que puede ejecutar pequeños programas. El controlador es más flexible que una unidad lógica dura cableada, pero más barato que una CPU de modo que es correcto para bloquear con simples bucles de preguntas.

El software controlador del dispositivo normalmente viene con el hardware DAQ o de otros proveedores, y permite que el sistema operativo pueda reconocer el hardware DAQ y dar así a los programas acceso a las señales de lectura por el hardware DAQ. Un buen conductor ofrece un alto y bajo nivel de acceso.

#### **d.1.4.2.2 La etapa de acondicionamiento de la señal**

Con más detalle, en una etapa de acondicionamiento (Figura 8) podemos encontrar estas etapas, aunque no todas están siempre presentes:

**Amplificación:** Es el tipo más común de acondicionamiento. Para conseguir la mayor precisión posible la señal de entrada debe ser amplificada de modo que su máximo nivel coincida con la máxima tensión que el convertidor pueda leer.

**Aislamiento:** Otra aplicación habitual en el acondicionamiento de la señal es el aislamiento eléctrico entre el transductor y el ordenador, para proteger al mismo de transitorios de alta tensión que puedan dañarlo. Un motivo adicional para usar

aislamiento es el garantizar que las lecturas del convertidor no son afectadas por diferencias en el potencial de masa o por tensiones en modo común.

Cuando el sistema de adquisición y la señal a medir están ambas referidas a masa pueden aparecer problemas si hay una diferencia de potencial entre ambas masas, apareciendo un "bucle de masa", que puede devolver resultados erróneos.

Multiplexado: es la conmutación de las entradas del convertidor, de modo que con un solo convertidor podemos medir los datos de diferentes canales de entrada. Puesto que el mismo convertidor está midiendo diferentes canales, su frecuencia máxima de conversión será la original dividida por el número de canales muestreados. Se aconseja que los multiplexores se utilicen antes del conversor y después del condicionamiento de la señal, ya que de esta manera no molestará a los aislantes que podamos tener.

Filtrado: El fin del filtro es eliminar las señales no deseadas de la señal que estamos observando. Por ejemplo, en las señales cuasi-continuas, (como la temperatura) se usa un filtro de ruido de unos 4 Hz, que eliminará interferencias, incluidos los 50/60 Hz de la red eléctrica.

Las señales alternas, tales como la vibración, necesitan un tipo distinto de filtro, conocido como filtro antialiasing, que es un filtro pasa-bajo pero con un corte muy brusco, que elimina totalmente las señales de mayor frecuencia que la máxima a medir, ya que si no se eliminasen aparecerían superpuestas a la señal medida, con el consiguiente error.

Excitación: La etapa de acondicionamiento de señal a veces genera excitación para algunos transductores, como por ejemplos las galgas "extesométricas", "termistores" o "RTD", que necesitan de la misma, bien por su constitución interna, (como el termistor, que es una resistencia variable con la temperatura) o bien por la configuración en que se conectan (como el caso de las galgas, que se suelen montar en un puente de Wheatstone).

Linealización: Muchos transductores, como los termopares, presentan una respuesta no lineal ante cambios lineales en los parámetros que están siendo medidos. Aunque la linealización puede realizarse mediante métodos numéricos en el sistema de adquisición de datos, suele ser una buena idea el hacer esta corrección mediante circuitería externa (Mendiburu Díaz, 2006).

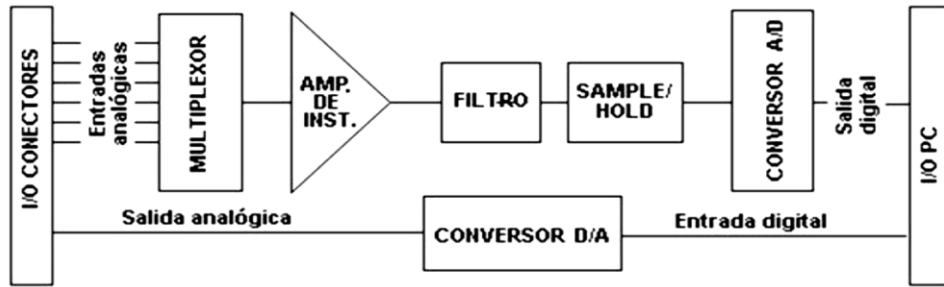


Figura 8. Proceso de acondicionamiento de señales (Mendiburu Díaz, 2006)

### d.1.4.3 Tarjeta Arduino

#### d.1.4.3.1 Descripción

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

#### d.1.4.3.2 Características de la tarjeta Arduino Mega2560 r3



Figura 9. Tarjeta Arduino Mega 2560 r3

La tarjeta Arduino Mega2560 r3(Figura 9) consta de las siguientes características:

- Microprocesador: ATmega2560
- Voltaje de funcionamiento: 5 V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12 V
- Voltaje de Entrada (límites): 6-20 V

- Entradas/Salidas Digitales: 54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
- Entradas analógicas: 16
- Corriente continua para las E/S: 40 mA
- Corriente continua para los pines de 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB, 8 KB utilizado por el gestor de arranque
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidad de reloj 16 MHz

#### d.1.4.3.3. Interfaz de LabVIEW para Arduino (LIFA)

La interfaz de LabVIEW para Arduino (Figura 10) es un kit de herramientas descargable que contiene VI's (Instrumentos Virtuales) especialmente diseñados para controlar la tarjeta Arduino cuando está conectada a la PC mediante el cable USB o vía Xbee/Bluetooth.

Para que la placa sea reconocida por LabVIEW es necesario instalar en la tarjeta un sketch (Rutina o código de programación utilizado para Arduino) mediante el software de Arduino, y tener actualizado el software con los últimos drivers.

Una vez conectada la tarjeta Arduino a LabVIEW se puede utilizar muchas de las funciones de este software y programar con gran facilidad además de poder realizar Interfaces para el usuario elaboradas y con resultados elegantes.

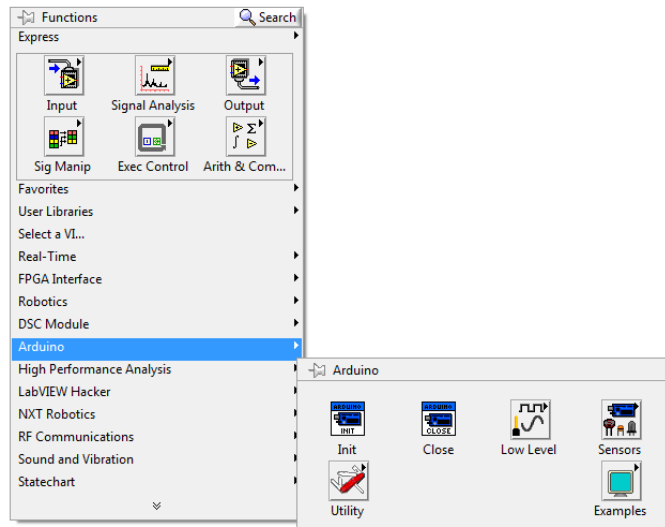


Figura 10. Menú de opciones LIFA (Autor).

El kit de herramientas de LabVIEW para Arduino contiene VI's necesarios para trabajar con ciertos sensores pero hay otros para los que se requiere crear el VI respectivo así como agregar la librería del mismo al sketch que se programa en el software de Arduino, esto requiere un poco de programación que no resulta complicada y para lo que se puede hallar mucha información especialmente en los foros creados por LabVIEW para discusión del kit de herramientas para Arduino, este es el caso del sensor HC-SR04 para el cual el VI se encuentra en este foro así como todas las instrucciones para hacerlo funcionar correctamente.

#### d.1.1.4.4 LabVIEW

LabVIEW (Figura 11) es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

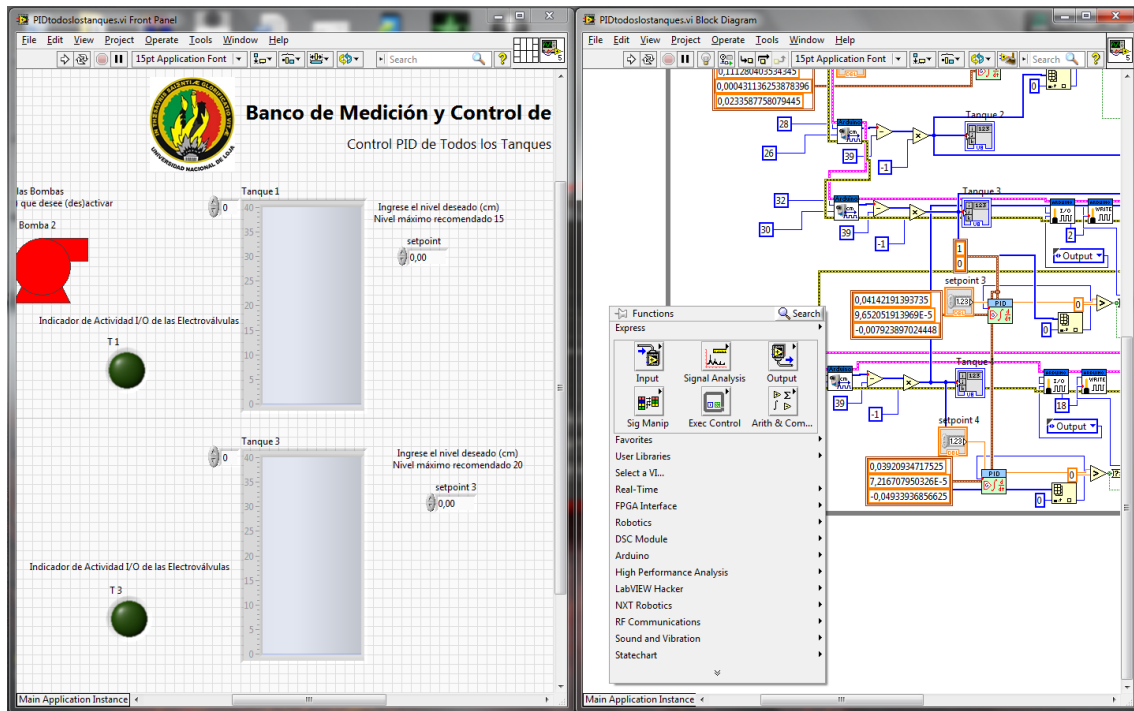


Figura 11. Pantalla de Labview (izq. Panel Frontal; der. Diagrama de Bloques) (Autor)

Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. La última versión es la 2012.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales (VI's), y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida. Un lema tradicional de LabVIEW es: "La potencia está en el Software", que con la aparición de los sistemas multinúcleo se ha hecho aún más potente. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. LabVIEW consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante -

tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, instrumentos y otro Hardware- como de otros fabricantes.

#### **d.1.4.4.1 Principales características**

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, que resultarían demasiado complejos en lenguajes tradicionales. También es muy rápido programar con LabVIEW y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él, con LabVIEW pueden crearse programas de miles de Vis (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, proyectos para combinar nuevos VIs con VIs ya creados, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación. El LabVIEW 7.0 introdujo un nuevo tipo de subVI llamado VIs Expreso (Express VIS). Estos son VIs interactivos que tienen una configuración de caja de diálogo que permite al usuario personalizar la funcionalidad del VI Expreso. El Vis estándar son VIs modulares y personalizables mediante cableado y funciones que son elementos fundamentales de operación de LabVIEW. Presenta facilidades para el manejo de:

- Interfaces de comunicaciones:
  - Puerto serie
  - Puerto paralelo
  - GPIB
  - PXI
  - VXI
  - TCP/IP, UDP, DataSocket
  - Irda
  - Bluetooth
  - USB

- OPC...
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones:
  - DLL: librerías de funciones
  - .NET
  - ActiveX
  - Multisim
  - Matlab/Simulink
  - AutoCAD, SolidWorks, etc
- Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales:
  - Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
  - Adquisición y tratamiento de imágenes.
  - Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).
  - Tiempo Real estrictamente hablando.
  - Programación de FPGAs para control o validación.
  - Sincronización entre dispositivos.



## d.1.4.5 MATLAB

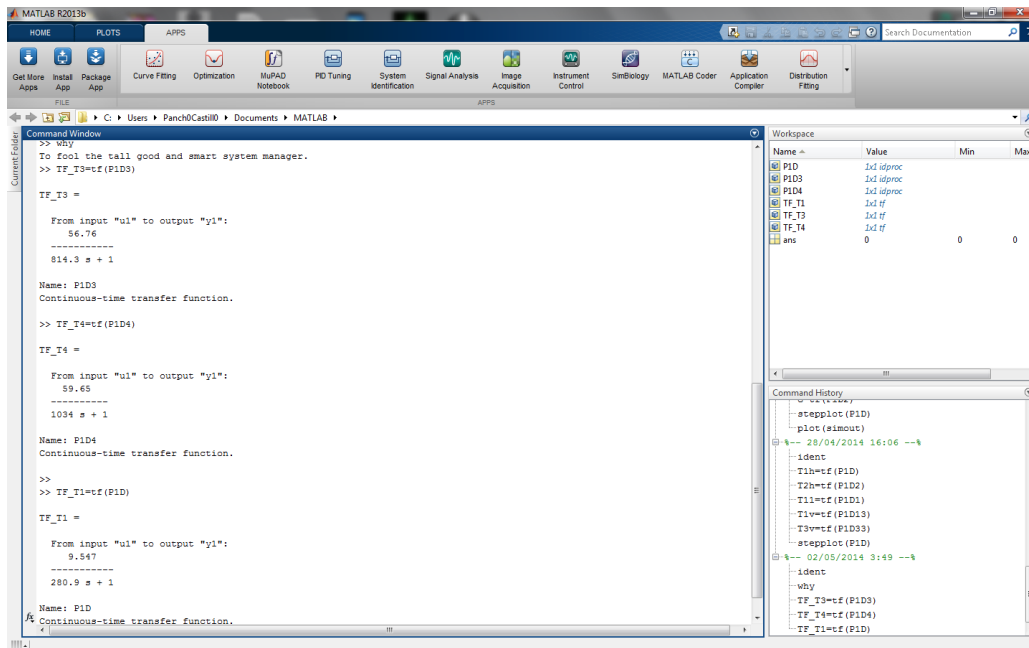


Figura 12. Pantalla Inicial de Matlab (Autor)

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices")(Figura 12) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X yGNU/Linux .

MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java.

MATLAB se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional. Más de un millón de ingenieros y científicos de la industria y la educación utilizan MATLAB, el lenguaje del cálculo técnico.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de

usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas(toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

### 1.4.5.1 Simulink

Simulink (Figura 13) es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model").

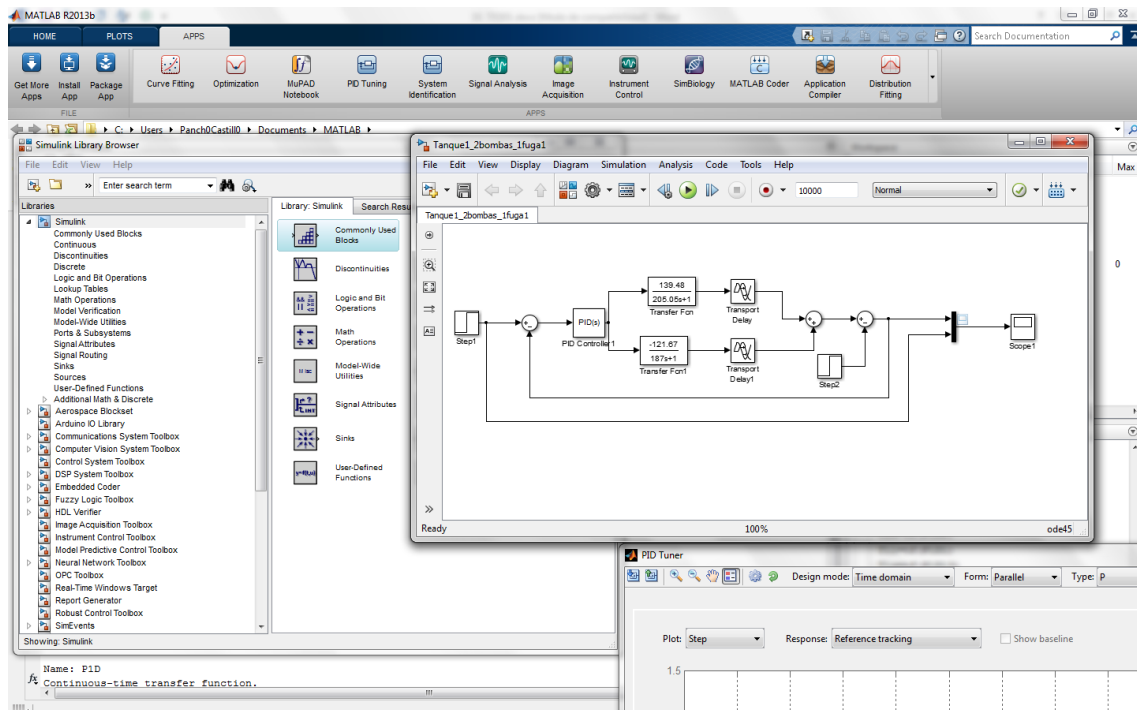


Figura 13. Captura de pantalla de un modelo siendo trabajado Simulink.y su librería (Autor)

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Se emplea arduamente en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica.

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos.

Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

System Identification Toolkit (kit de herramientas para identificación de sistemas): construye modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de los datos de entrada-salida medidos. Proporciona funciones, una aplicación de identificación de sistema y bloques de Simulink para crear y utilizar modelos de sistemas dinámicos no fácilmente modelados a partir de primeros principios o especificaciones. Puede utilizar los datos de entrada-salida de dominio de tiempo y dominio de la frecuencia para identificar las funciones de transferencia de tiempo discreto de tiempo continuo y , modelos de procesos y modelos de espacio de estado .

La caja de herramientas ofrece máxima verosimilitud, la reducción al mínimo de predicción de errores (PEM), la identificación del sistema de subespacio, y otras técnicas de identificación. Para la dinámica de sistemas no lineales, se puede estimar modelos Hammerstein - Weiner y modelos no lineales ARX con la red wavelet, árbol -partición, y no linealidades red sigmoide. La caja de herramientas se realiza la identificación del sistema de color gris -box para la estimación de parámetros de un modelo definido por el usuario . Usted puede utilizar el modelo identificado para la

predicción de la respuesta del sistema y para la simulación en Simulink . La caja de herramientas también le permite modelar los datos de series de tiempo y realizar la predicción de series de tiempo.

## **d.2 CAPÍTULO II: MODELAMIENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

En ciencias aplicadas, un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. El término modelización matemática es utilizado también en diseño gráfico cuando se habla de modelos geométricos de los objetos en dos (2D) o tres dimensiones (3D).

El significado de modelo matemático en matemática fundamental, sin embargo es algo diferente. En concreto en matemáticas se trabajan con modelos formales. Un modelo formal para una cierta teoría matemática es un conjunto sobre el que se han definido un conjunto de relaciones unarias, binarias y trinarias, que satisface las proposiciones derivadas del conjunto de axiomas de la teoría. La rama de la matemática que se encarga de estudiar sistemáticamente las propiedades de los modelos es la teoría de modelos.

### **d.2.1 Clasificaciones de los modelos**

Se podría decir que un modelo de las ciencias físicas es una traducción de la realidad física de un sistema en términos matemáticos, es decir, una forma de representar cada uno de los tipos entidades que intervienen en un cierto proceso físico mediante objetos matemáticos. Las relaciones matemáticas formales entre los objetos del modelo, deben representar de alguna manera las relaciones reales existentes entre las diferentes entidades o aspectos del sistema u objeto real. Así una vez "traducido" o "representado" cierto problema en forma de modelo matemático, se pueden aplicar el cálculo, el álgebra y otras herramientas matemáticas para deducir el comportamiento del sistema bajo estudio. Un modelo físico requerirá por tanto que se pueda seguir el camino inverso al modelado, permitiendo reinterpretar en la realidad las predicciones del modelo (Ríos, 1995).

### **d.2.1.1 Según la información de entrada**

Con respecto a la función del origen de la información utilizada para construir los modelos pueden clasificarse de otras formas. Podemos distinguir entre modelos heurísticos y modelos empíricos:

#### **d.2.1.1.1 Modelos heurísticos**

Del griego euriskein 'hallar, inventar'. Son los que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado.

#### **d.2.1.1.2 Modelos empíricos:**

Del griego empeirikos relativo a la 'experiencia'. Son los que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.

### **d.2.1.2 Según el tipo de representación**

Además los modelos matemáticos encuentran distintas denominaciones en sus diversas aplicaciones. Una posible clasificación puede atender a si pretenden hacer predicciones de tipo cualitativo o pretende cuantificar aspectos del sistema que se está modelando:

#### **d.2.1.2.1 Modelos cualitativos o conceptuales**

Estos pueden usar figuras, gráficos o descripciones causales, en general se contentan con predecir si el estado del sistema irá en determinada dirección o si aumentará o disminuirá alguna magnitud, sin importar exactamente la magnitud concreta de la mayoría de aspectos.

#### **d.2.1.2.2 Modelos cuantitativos o numéricos**

Usan números para representar aspectos del sistema modelado, y generalmente incluyen fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos que relacionan los valores numéricos. El cálculo con los mismos permite representar el proceso físico o los cambios cuantitativos del sistema modelado.

### **d.2.1.3 Según la aleatoriedad**

Otra clasificación independiente de la anterior, según si a una entrada o situación inicial concreta pueden corresponder o no diversas salidas o resultados, en este caso los modelos se clasifican en:

#### **d.2.1.3.1 Determinista**

Se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.

#### **d.2.1.3.2 Estocástico**

Probabilístico, que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

### **d.2.1.4 Clasificación según su aplicación u objetivo**

Por su uso suelen utilizarse en las siguientes tres áreas, sin embargo existen muchas otras como la de finanzas, ciencias etc.

#### **d.2.1.4.1 Modelo de simulación o descriptivo**

De situaciones medibles de manera precisa o aleatoria, por ejemplo con aspectos de programación lineal cuando es de manera precisa, y probabilística o heurística cuando es aleatorio. Este tipo de modelos pretende predecir qué sucede en una situación concreta dada.

#### **d.2.1.4.2 Modelo de optimización**

Para determinar el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción, o cualquier otra situación. Cuando la optimización es entera o no lineal, o combinada, se refiere a modelos matemáticos poco predecibles, pero que pueden acoplarse a alguna alternativa existente y aproximada en su cuantificación. Este tipo de modelos requiere comparar diversas condiciones, casos o posibles valores de un parámetro y ver cuál de ellos resulta óptimo según el criterio elegido.

#### **d.2.1.4.3 Modelo de control**

Para saber con precisión como está algo en una organización, investigación, área de operación, etc. Este modelo pretende ayudar a decidir qué nuevas medidas, variables o qué parámetros deben ajustarse para lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.

### **d.2.2 Identificación de sistemas**

#### **d.2.2.1 Identificación de analítica**

Consiste en desarrollar un modelo basado en las relaciones físico químicas del proceso por identificar planteando ecuaciones de balance de masa, energía, etc. Este enfoque conduce generalmente a modelos complejos y no lineales que deben ser sometido a un proceso de simplificación y linealización. El inconveniente principal de este enfoque consiste en que requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, que no siempre está disponible. (AGUADO Behar, 2000)

#### **d.2.2.2 Identificación recursiva**

Toma como base modificaciones del método de mínimos cuadrados. Se asume una estructura fija del modelo que consiste casi siempre en una ecuación de diferencias lineales. Lo característico de este enfoque es que se parte de una estimación generalmente arbitraria, de los parámetros del modelo que se va actualizando y mejorando con cada nueva información obtenida. Aunque este tipo de identificación está concebida fundamentalmente para usarse dentro de un esquema de control adaptable, también por razones de conveniencia práctica, se ha utilizado para obtener modelos para estudios de simulación. Como los datos que se utilizan tienen generalmente la forma de secuencias discretas de mediciones de variables del proceso, los modelos que se identifican son también de naturaleza discreta. (AGUADO Behar, 2000)

#### **d.2.2.3 Identificación Experimental mediante Señales Especiales**

Este es el enfoque más directo y el que puede producir resultados a más corto plazo. Las señales utilizadas con más frecuencia son los escalones y las llamadas secuencias binarias pseudo-aleatorias. También se han hecho intentos con rampas, sinusoides, impulsos y otras. La restricción más importante de esta solución es la necesidad de



introducir perturbaciones condicionales ideales, el experimento de identificación debería hacerse contando con una computadora conectada en línea con el proceso, pero en la práctica, en muchas ocasiones, es necesario basarse en observaciones periódicas de las variables y el procesamiento fuera de línea de los datos.

#### **d.2.2.3.1 Identificación experimental usando la respuesta a la señal en escalón.**

La señal más simple que puede utilizarse para la identificación es, sin duda, la función escalón. Esta señal se aproxima, por ejemplo, mediante la apertura o cierre súbitos de una válvula, un cambio rápido de voltaje o corriente que alimenta algún tipo de actuador eléctrico, etc. Un escalón ideal es una señal cuyo tiempo de crecimiento inicial es cero. Físicamente esa señal no puede ser creada, pero si el tiempo de crecimiento inicial es más pequeño que el periodo de la frecuencia máxima de interés, el error que se introduce se puede considerar despreciable. La función escalón es la señal que más se ha aplicado en la práctica convencional del control automático y con ella es posible obtener modelos sencillos suficientemente exactos sobre todo en los casos de procesos mono-variables simples y poco perturbados. (AGUADO Behar, 2000)

##### **d.2.2.3.1.1 Estimación de los parámetros de los modelos de primer orden con retardo.**

Para que un sistema sea considerado de primer orden su respuesta a la señal de escalón debe tomar una forma como la figura 14, la ecuación que describe esta respuesta es:

$$y(t) = KU(1 - e^{-\frac{t-\theta}{T_1}}) \quad (6)$$

Siendo U la amplitud del escalón aplicado a la entrada, para  $t - \theta = T_1$  se tiene que

$$y(t = \theta + T_1) = KU(1 - e^{-1}) = 0.632KU \quad (7)$$

Es decir, localizando el punto donde la respuesta alcanza el 63,2% de su valor final se obtiene inmediatamente el valor de T1. La ganancia K se determina como

$$K = \frac{Y_{est}}{U} \quad (8)$$

En donde Yest es el valor estacionario de la respuesta y U la amplitud del escalón.

Para obtener una estimación del modelo más precisa es posible tomar 2 puntos en la curva correspondientes al 63,2% y al 28,4% del valor estacionario final se determinan  $t_{0,284}$   $t_{0,632}$  y se plantean las ecuaciones:

$$t_{0,284} = \theta + T_1/3 \quad (9)$$

$$t_{0,632} = \theta + T_1 \quad (10)$$

Y se procede a calcular los parámetros  $\theta$  y  $T_1$

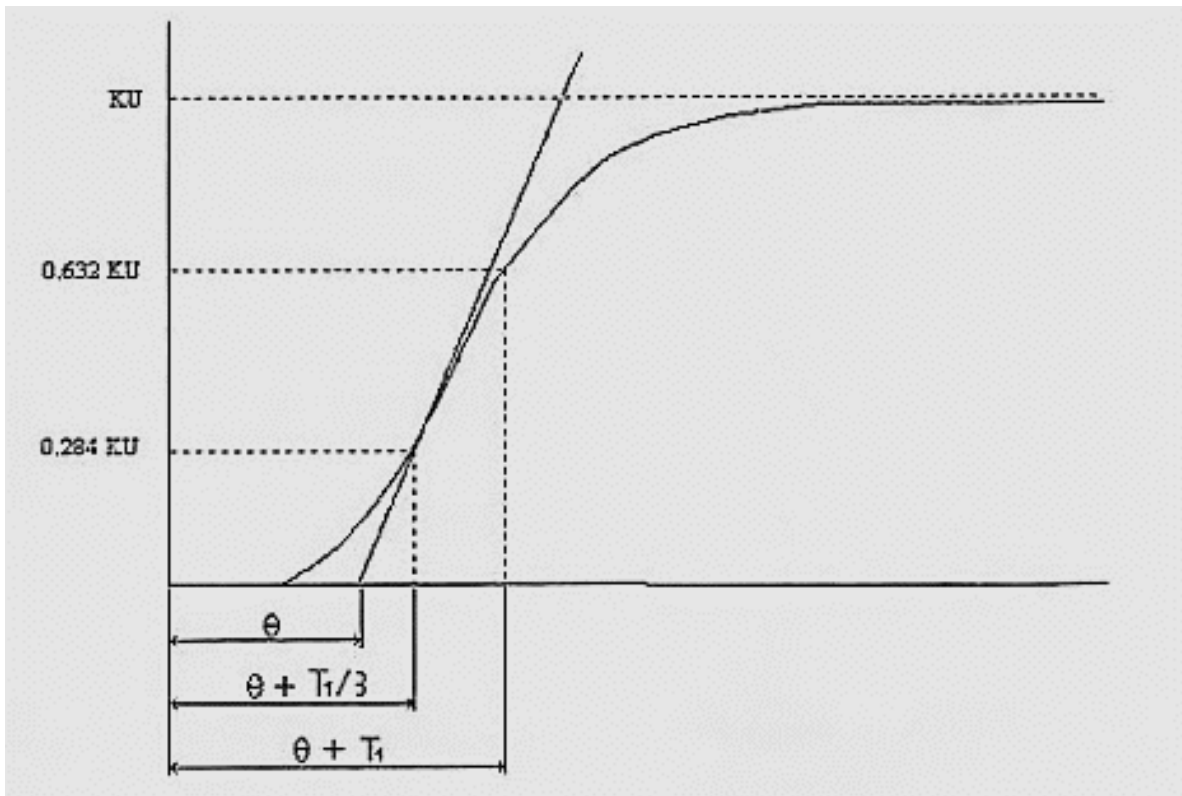


Figura 14. Respuesta a la señal de escalón de un sistema de primer orden (AGUADO Behar, 2000)

### d.2.2.3.1.2 Estimación de los parámetros de modelos de segundo orden sobre-amortiguados.

Para la estimación de este tipo de modelo se usa como punto de partida la figura 15.

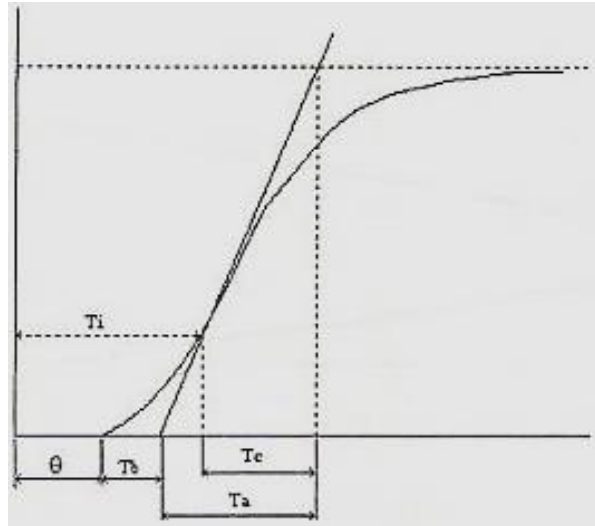


Figura 15. Respuesta a la señal de escalón de un modelo de segundo orden sobre-amortiguado (AGUADO Behar, 2000).

Es posible demostrar que se cumplen las relaciones:

$$\frac{T_c}{T_b} = (1 + x)x^{\frac{x}{1-x}} \quad (11)$$

$$T_1 + T_2 = T_c \quad (12)$$

$$x = \frac{T_1}{T_2} \quad (13)$$

Para resolver estas ecuaciones se toma como referencia la figura 16, se entra con el valor del cociente  $T_c/T_a$  y se determinan dos valores en la curva correspondiente a  $T_1/T_a$  y  $T_2/T_a$ . Tomando en cuenta la ecuación:

$$\frac{T_b}{T_a} = -\frac{04729T_c}{T_a} + 0,4512 \quad (14)$$

y entonces:

$$\theta = T_i + T_c - T_a - T_b \quad (15)$$

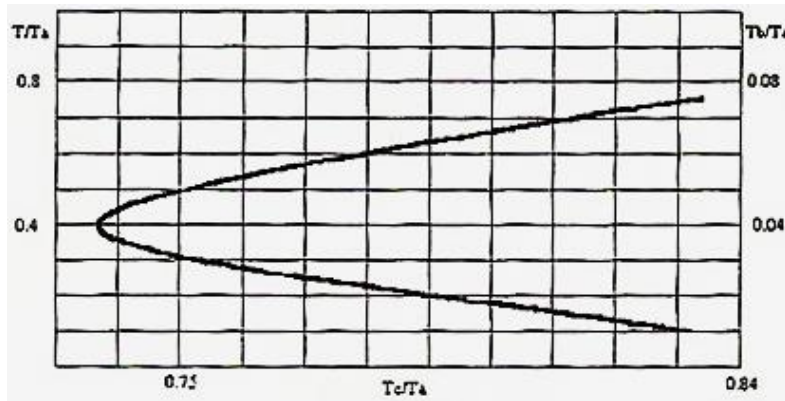


Figura 16. Curva correspondiente a  $T1/Ta$  y  $T2/Ta$  (AGUADO Behar, 2000)

#### d.2.2.4 Procedimiento Experimental:

1. Obtención de datos de las señales de entrada y salida del sistema analizado
2. Analizar los datos para determinar a qué tipo de sistema corresponden
  - Sistema Lineal
  - Sistema no-Lineal
3. Obtener el modelo deseado en base a los 2 pasos previos utilizando el kit de herramientas de identificación de sistemas de Matlab que dependiendo del tipo de sistema que se tenga entrega un modelo del tipo deseado y con el porcentaje de aproximación al sistema real.

#### d.2.3 Control PID

Aplicar un régimen de control PID significa aplicar adecuadamente la suma de 3 acciones de control: acción proporcional, acción integral y acción derivativa; que serán descritas brevemente a continuación.

##### d.2.3.1 Acción proporcional

Es proporcional al error de control instantáneo de acuerdo a la expresión:

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (16)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional. Su funcionamiento es sencillo, incrementa la variable de control cuando el error de control es grande. La función de transferencia de un controlador proporcional se puede derivar como:

$$C(s) = K_p \quad (17)$$

Con respecto a un controlador Todo/Nada, un controlador proporcional tiene la ventaja de proporcionar variable control pequeña cuando el error de control es pequeño y por lo tanto evita esfuerzos innecesarios en el instrumento de control. El principal inconveniente que presenta este tipo de controlador en estado puro es que se produce un error de estado estacionario<sup>1</sup>. Esto sucede incluso cuando el proceso presenta una dinámica integrativa. Esto motiva la adición de un término de sesgo o reseteo  $u_b$ :

$$u(t) = K_p e(t) + u_b \quad (18)$$

El valor de  $u_b$  puede ser arreglado a un nivel constante usualmente al promedio de la variable de control o puede ser ajustado manualmente hasta que el error de estado estacionario sea reducido a cero. Esto no sirve de nada cuando en los productos comerciales la ganancia proporcional es usualmente reemplazada por la banda proporcional BP, que es el rango de error que causa un cambio completo en el rango de la variable de control, por ejemplo

$$BP = \frac{100}{K_p} \quad (19)$$

### d.2.3.2 Acción Integral

Es proporcional a la integral del error de control, por ejemplo:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (20)$$

Donde  $K_i$  es la ganancia integral. Al estar relacionada a los valores pasados de control de error la función de transferencia correspondiente es

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (21)$$

La presencia de un polo al origen del plano complejo permite la reducción a cero del error de estado estacionario cuando una señal escalón de referencia es aplicada o sucede una perturbación de carga en escalón. La acción integral es capaz de establecer automáticamente el valor correcto de  $u_b$  en la ecuación 18 de manera que el error de

---

<sup>1</sup> El error en estado estacionario es una falla en la medida de la exactitud de un sistema de control para seguir una entrada dada, después de desaparecer la respuesta transitoria.

estado estacionario es cero. Este hecho está mejor explicado en la figura 17 (VISIOLI, 2006), en donde la función de transferencia resultante es la ecuación 22 que es el resultado de un control PI. Por esta razón la acción integral es también llamada reseteo automático.

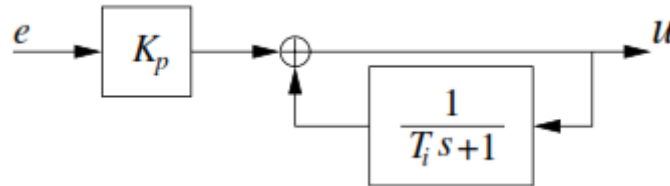


Figura 17: Controlador PI en configuración de reseteo automático (AGUADO Behar, 2000)

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (22)$$

### d.2.3.3 Acción Derivativa

La acción derivativa está basada en valores de error de control futuros predichos. Una expresión de control derivativa ideal puede ser expresada como:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

Donde  $K_d$  es la ganancia derivativa, y su respectiva función de transferencia es:

$$C(s) = K_d s \quad (24)$$

Para comprender de mejor manera el significado de la acción derivativa, es conveniente considerar los primeros dos términos de las series de Taylor de expansión de error de control en el tiempo  $T_d$ :

$$e(t + T_d) \cong e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

Si se agrega una ley de control proporcional a esta expresión se tiene un controlador PD (ecuación 26). El control variable en el tiempo  $t$  está basado por lo tanto en el valor predicho del error de control en el tiempo  $t+T_d$ , por este motivo la acción derivativa es también llamada control anticipado, velocidad de reacción o pre-acción.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (26)$$

#### d.2.3.4 Estructuras de controladores PID

La combinación de las acciones proporcional, integral y derivativa puede ser lograda de diferentes maneras. Se tiene la forma ideal(figura 18) (VISIOLI, 2006) o no interactuante cuyo control PID es descrito por la siguiente función de transferencia:

$$C_i(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (27)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es la integral contante del tiempo y  $T_d$  es la derivada constante del tiempo. También se tiene la forma en serie(figura 19) (VISIOLI, 2006) o interactuante:

$$C_s(s) = K'_p \left( 1 + \frac{1}{T'_i s} \right) (T'_d s + 1) = K'_p \left( \frac{T'_i s + 1}{T'_i s} \right) (T'_d s + 1) \quad (28)$$

En donde el hecho que el modificar el valor de la derivada constante del tiempo  $T'_d$  afecte también la acción integral justifica la nomenclatura adoptada. Es importante recalcar que un controlador PID en serie puede ser representado siempre en la forma ideal aplicando las siguientes fórmulas:

$$K_p = K'_p \frac{T'_i + T'_d}{T'_i} \quad (29)$$

$$T_i = T'_i + T'_d \quad (30)$$

$$T_d = \frac{T'_i T'_d}{T'_i + T'_d} \quad (31)$$

Y existe también una forma en paralelo(figura 20) de implementar un controlador PID siendo la más utilizada junto con la forma estándar:

$$C_p s = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (32)$$

En este caso las 3 acciones están completamente separadas; de hecho la forma en paralelo es la más general de todas, porque permite desactivar exactamente la acción integral cambiando  $K_i$  a cero (en las otras formas el valor integral tiende a ir a cero). La conversión entre los parámetros del control PID en paralelo y el ideal se pueden hacer mediante las siguientes fórmulas:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (33)$$

$$K_d = K_p T_d$$

(34)

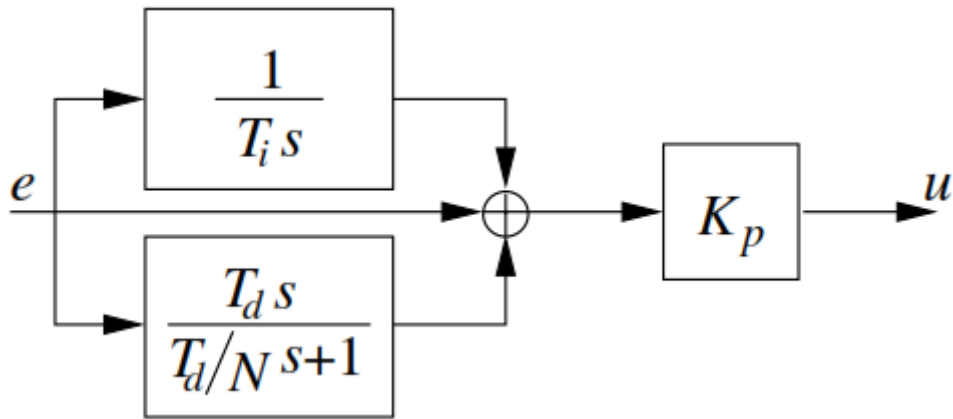


Figura 18 Control PID en su forma estándar (AGUADO Behar, 2000)

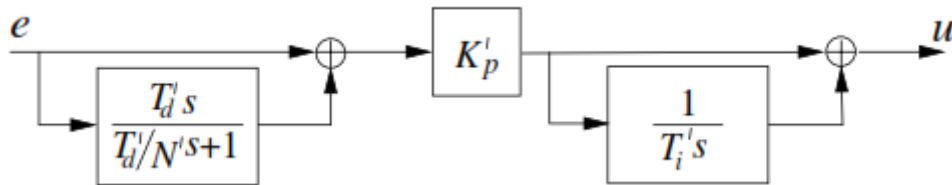


Figura 19 Control PID en serie (AGUADO Behar, 2000)

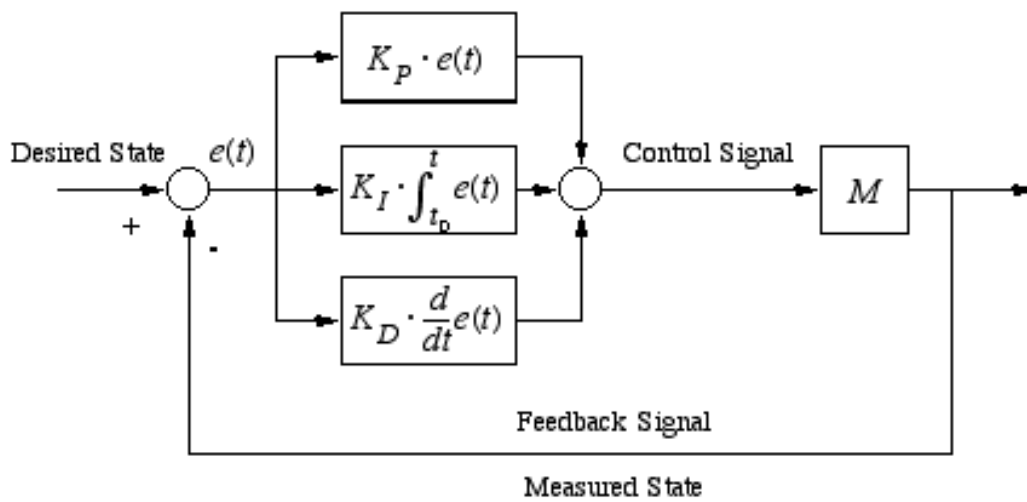


Figura 20 Control PID en paralelo (VISIOLI, 2006)



## **e. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **e.1 Materiales**

- Computador
- Tarjeta Arduino Mega 2560 R3
- 10 Relés con bobina de 5VCD
- 10 LED a 5VDC
- 2 transistores ULN 2803
- Tarjeta perforada de cobre
- Cautín y estaño
- Borneras, cables y material de conexión eléctrica
- 1 fuente de poder a 12VCD
- 1 fuente de poder a 5VCD
- 2 Bombas centrífugas de ½ hp
- 4 Sensores ultrasónicos HC-SR04
- 8 Electroválvulas de 12 VCD de 1/4" de pulgada conector rápido
- Multímetro
- Software de ingeniería
- 4 Recipientes de vidrio de dimensiones 20x20x40 cm.
- Tubería PVC de 1"y ½"
- Varios conectores y reductores de 1", ½" y 1/4" de pulgada
- Manguera plástica de 1/4"
- 1 ½ planchas de Playwood de 18mm

- Materiales de carpintería

## **e.2 Métodos**

### **e.2.1 Pasos a Seguir**

Empleando el método científico y sus métodos derivados se procedió a efectuar los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica (Método Lógico Deductivo).
- Diseño eléctrico y electrónico (Método Empírico-Analítico).
- Diseño en AutoCAD de la estructura del banco (Método Empírico-Analítico).
- Construcción (Método Empírico-Analítico).
- Programación en LabView (Método Empírico-Analítico).
- Realización de los experimentos (Método Experimental, Método de la Medición, Método Empírico-Analítico).
- Utilización del kit de herramientas de Identificación de Sistemas de Matlab (Método Empírico-Analítico).
- Utilización de Simulink en Matlab (Método Empírico-Analítico).
- Ensayo y error para las conexiones, mediciones y controladores desarrollados (Método Experimental, Método de la Medición).

### **e.2.2 Descripción detallada**

#### **1. Descripción del Banco Desarrollado:**

La estructura del banco fue construida en dos módulos separables para facilitar su transporte, con placas de plywood (Figura 19) de 18 mm previo diseño en AutoCAD(Anexo Diseño de la estructura del banco), cada tanque de trabajo está hecho en vidrio de 6 mm con medidas de 20x20(base)x40(altura)(Figura 20).

Las bombas están ubicadas en la base del banco junto con el reservorio de agua para los tanques (Figura 21), para evitar sobrepresión en las electroválvulas se colocó a la salida

de las bombas un bypass de regreso al tanque (Figura22), en esta bifurcación también está ubicada la reducción a ¼” en la que se conectan las mangueras que van hacia cada electroválvula(Anexo Diagrama de Flujo del Proceso).



Figura 19. Banco Completo Armado (Autor)

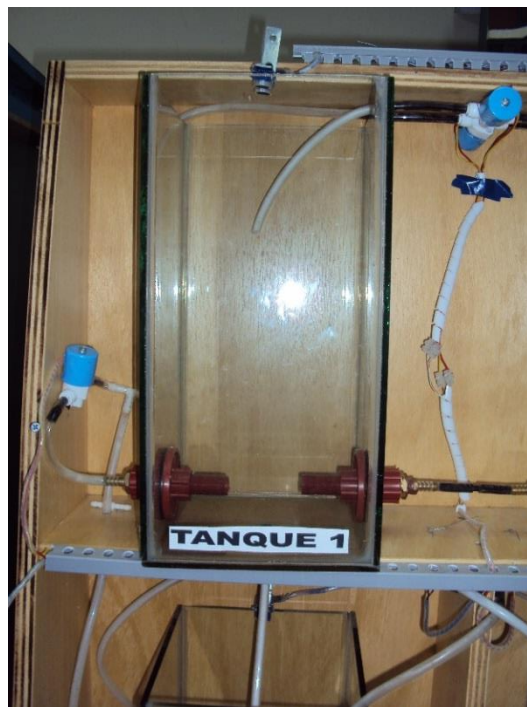


Figura 20. Tanque del Banco (Autor)

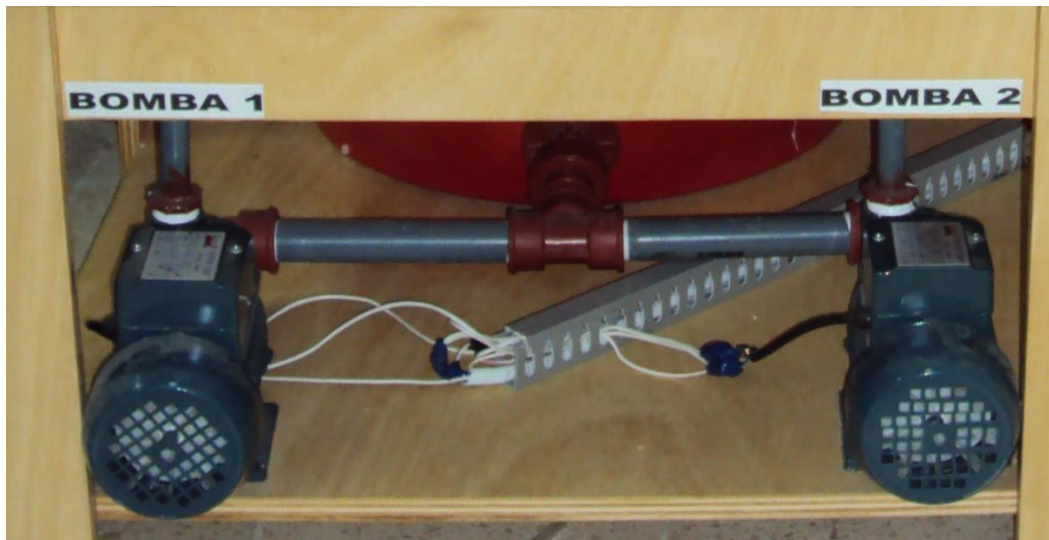


Figura 21. Bombas conectadas al tanque reservorio (Autor)



Figura 22. Bypass hacia el reservorio (Autor)

La tarjeta Arduino está montada en una caja plástica de protección junto con los circuitos de los relés y la fuente de 12VCD (Figuras 23 y 24) (Anexo de Diagrama Electrónico).



Figura 23. Foto de la parte externa de la caja de circuitos (Autor)

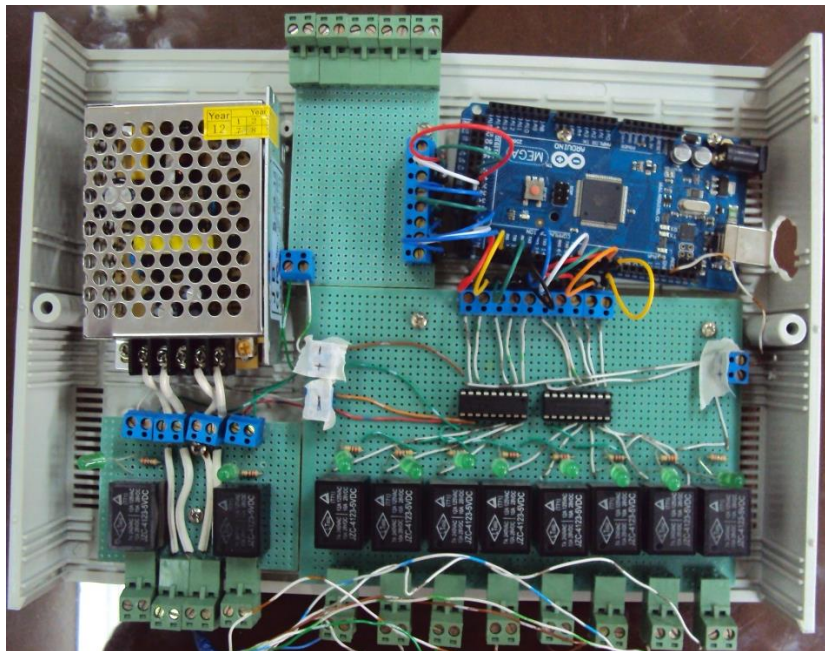


Figura 24. Foto del contenido de la caja de control (Autor)

## 2. Descripción del proceso de obtención de modelos

Una vez armado el banco con todos sus componentes y tomando en cuenta el diagrama del proceso (Anexo de Diagrama de flujo del proceso) se programó el sistema de control manual, medición automática y adquisición de datos en LabVIEW (Figuras 25 y 26) para realizar el procedimiento de identificación de sistemas.

En la figura 25 podemos observar la pantalla frontal del programa que contiene los elementos del banco en forma similar a la realidad y que permite al usuario control manualmente las distintas variables del proceso así como observar el nivel del líquido en los tanques, todo esto mientras los datos del experimento están siendo guardados en un archivo de medición como puede ser observado en la figura 26 que contiene el diagrama de bloques de este programa.

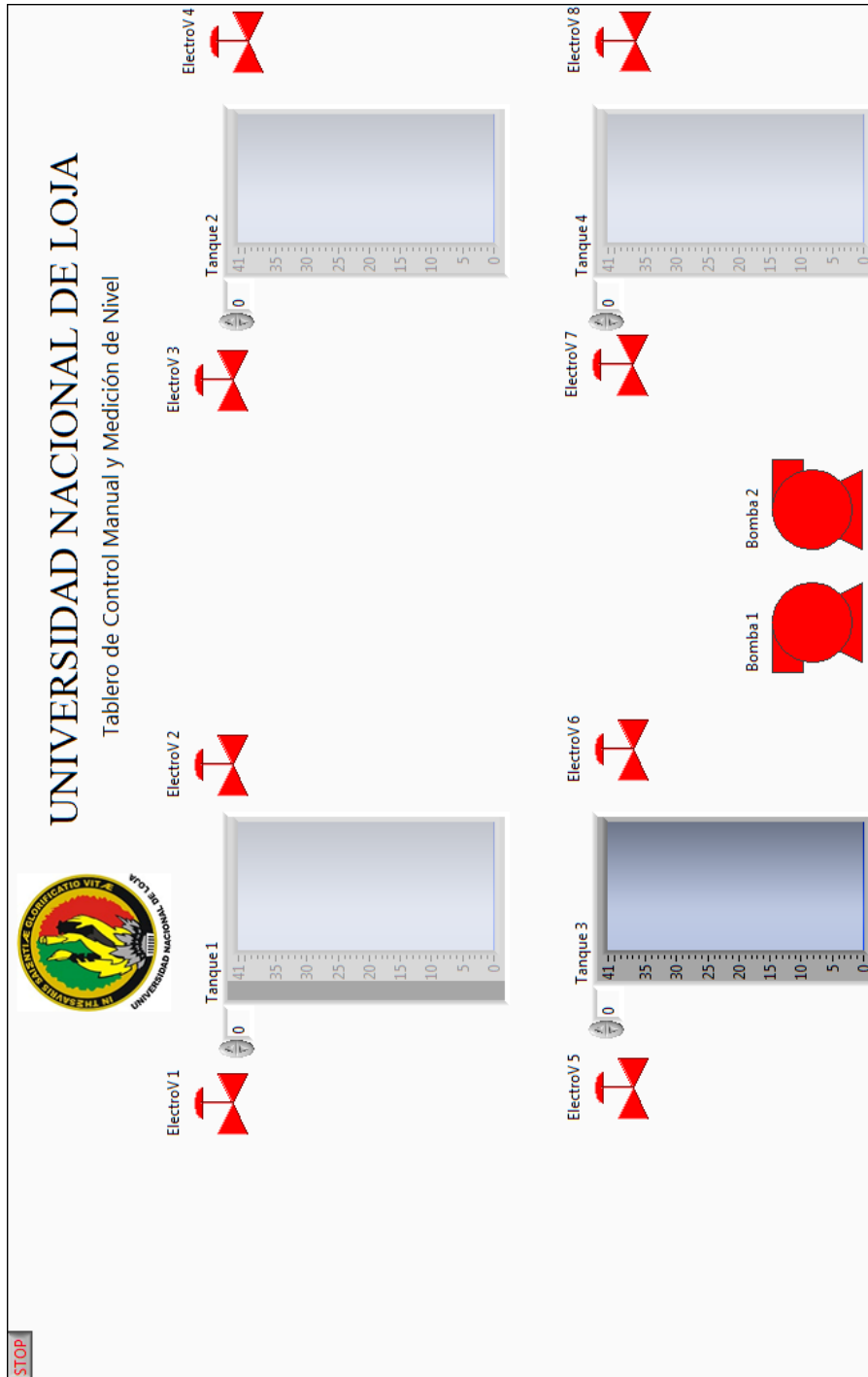


Figura 25. Pantalla de medición, control manual y obtención de datos en Labview (Autor)

Tarjeta Arduino utilizada así como el puerto de comunicación a la que está conectada

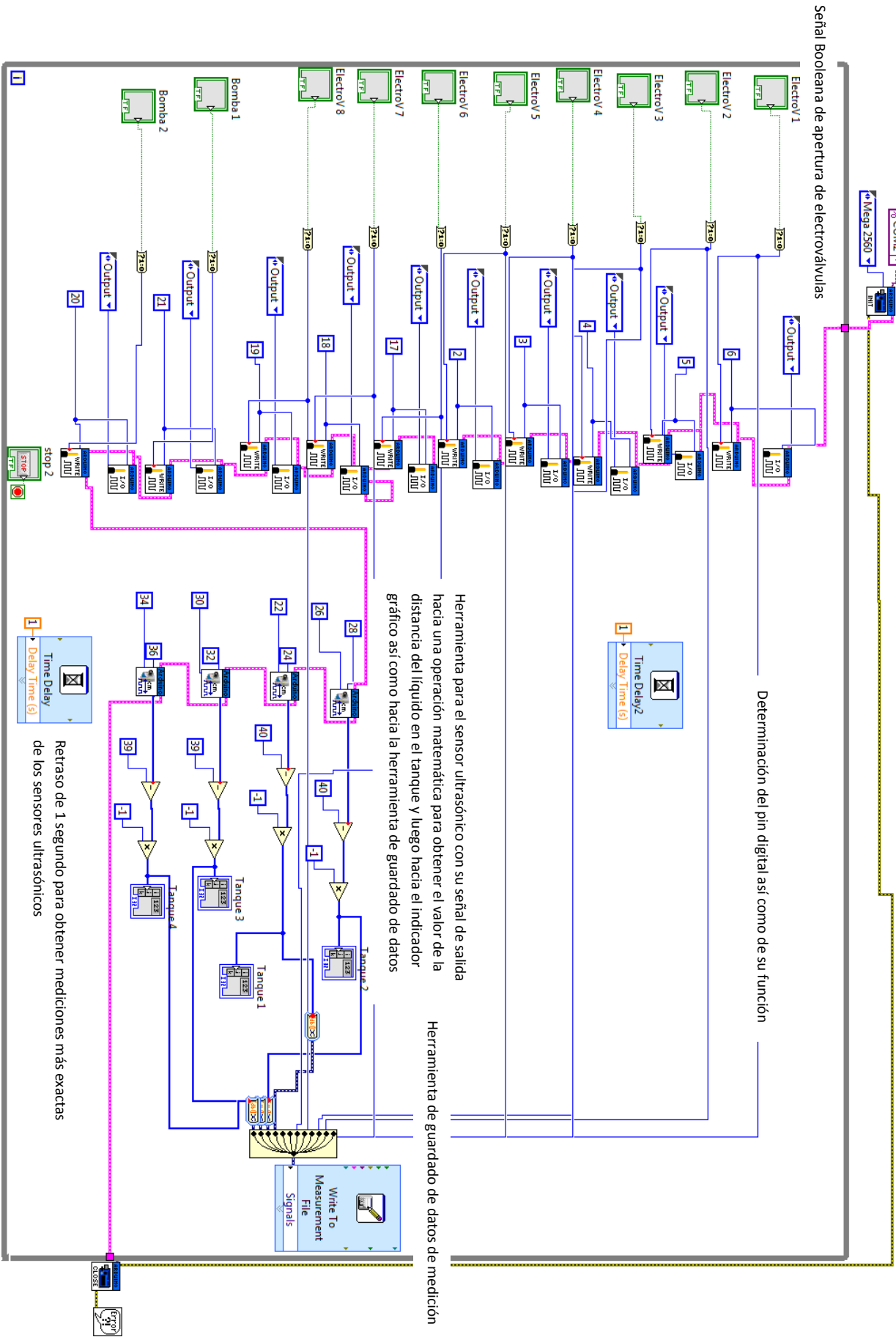


Figura 26. Diagrama de Bloques de medición, control manual y obtención de datos en Labview (Autor)

Con el programa se procedió a realizar pruebas para conocer los datos de medición de nivel en cada tanque y el estado de las electroválvulas(abierto o cerrado) (Figura 27).

Los experimentos para la identificación de sistemas consisten en dar apertura a las válvulas de cada tanque(señal escalón de entrada) y medir el nivel de líquido en cada tanque(señal de salida) de esta manera es posible obtener la función de transferencia del llenado de los tanques con la herramienta de Identificación de Sistemas de Matlab (Figura 28).

De las opciones que brinda esta herramienta de identificación se seleccionó la de Process Models (Modelo de proceso) que es la adecuada para obtener modelos matemáticos de procesos experimentales con fines de control como los desarrollados en este proyecto. Además es necesario elegir el orden del modelo, es posible indicar las condiciones iniciales o los parámetros conocidos para obtener la función de transferencia del proceso, en esta tesis los modelos obtenidos para los distintos procesos son de primer orden con retraso (35) y se dejó al software obtener los parámetros más adecuados.

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} \times e^{-T_d s} \quad (35)$$

Root Name	Title	Author	Date/Time	Groups	Description						
TodosLosTanques5.tdms		Tesis de Control UNL		1							
Group	Channels	Description	wf_xcolumns								
Untitled	13	One									
Channel	Datatype	Unit	Length	Minimum	Maximum	Description	NI_ChannelName	NI_ExpsRelativeTime	NI_ExpStartTimeStamp	NI_ExpTimeStamp	
Time	DT_DATE	s	825								
Untitled	DT_DOUBLE		825			Untitled		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 1	DT_DOUBLE		825			Untitled 1		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 2	DT_DOUBLE		825			Untitled 2		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 3	DT_DOUBLE		825			Untitled 3		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 4	DT_DOUBLE		825			Untitled 4		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 5	DT_DOUBLE		825			Untitled 5		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 6	DT_DOUBLE		825			Untitled 6		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 7	DT_DOUBLE		825			Untitled 7		0	24/01/2014 06:24:35,360 PM	24/01/2014 06:31:42,444 PM t	
Untitled 8	DT_DOUBLE		825			Untitled 8		1	24/01/2014 06:24:35,868 PM	31/12/1903 07:00:00,000 PM t	
Untitled 9	DT_DOUBLE		825			Untitled 9		1	24/01/2014 06:24:35,868 PM	31/12/1903 07:00:00,000 PM t	
Untitled 10	DT_DOUBLE		825			Untitled 10		1	24/01/2014 06:24:35,868 PM	31/12/1903 07:00:00,000 PM t	
Untitled 11	DT_DOUBLE		825			Untitled 11		1	24/01/2014 06:24:35,868 PM	31/12/1903 07:00:00,000 PM t	
Implicit	Start	Interval	Length								
Time	0	1	825								

Figura 27. Pantalla de datos en Excel de los datos medidos en Labview (Autor)



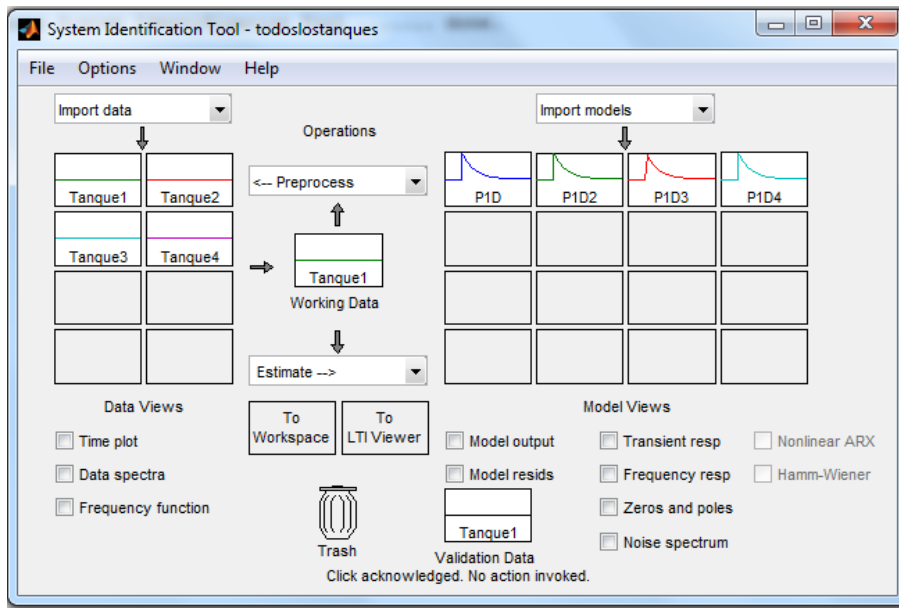


Figura 28. Pantalla de la herramienta de Identificación de Sistemas de Matlab (Autor)

### 3. Obtención de los parámetros de control PID.

A la función de transferencia obtenida en el paso anterior se procede a implementarla en Simulink junto con el control PID (forma paralelo) para obtener los parámetros de mejor funcionamiento de este con la herramienta de puesta a punto.

Primero se construye un diagrama de control en lazo cerrado ubicando en este la función de transferencia y el tiempo de retraso obtenidos en el paso anterior (Figura 29).

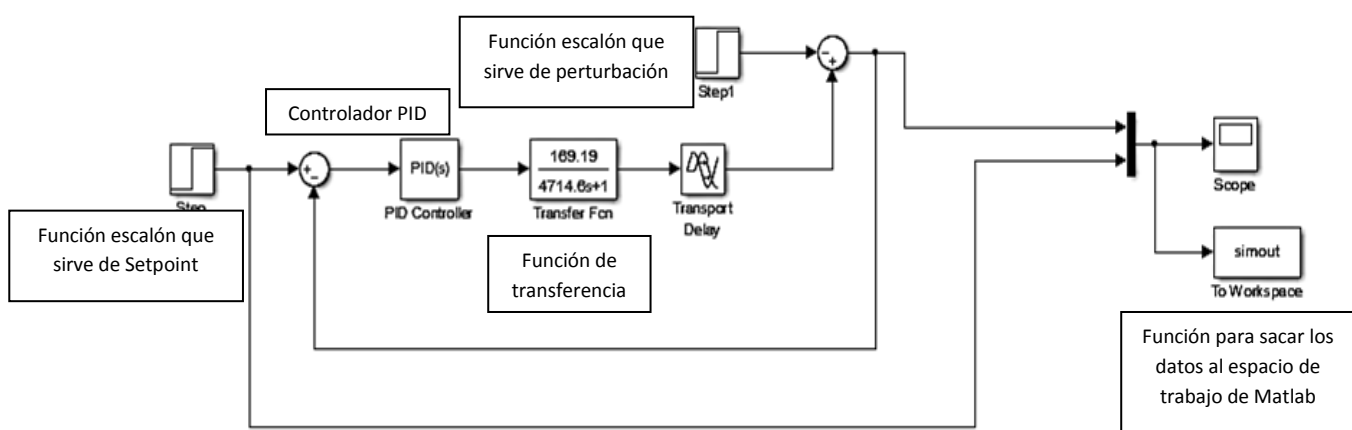


Figura 29. Diagrama de control PID en Simulink (Autor)

Una vez armado este diagrama se procede a obtener los valores para el control PID mediante la herramienta de puesta a punto (tuning) que tiene el bloque PID de Simulink

(Figura 30), este ofrece una primera puesta a punto que puede ser modificada por el usuario y de la cual depende el comportamiento de la curva de control y estabilización del sistema(Figura 31) esta herramienta presenta los datos más importantes que se pueden modificar hasta obtener los resultados deseados. Entre estos datos se encuentra el tiempo de subida, el tiempo de estabilización, el porcentaje que la señal excederá su setpoint, entre otros.

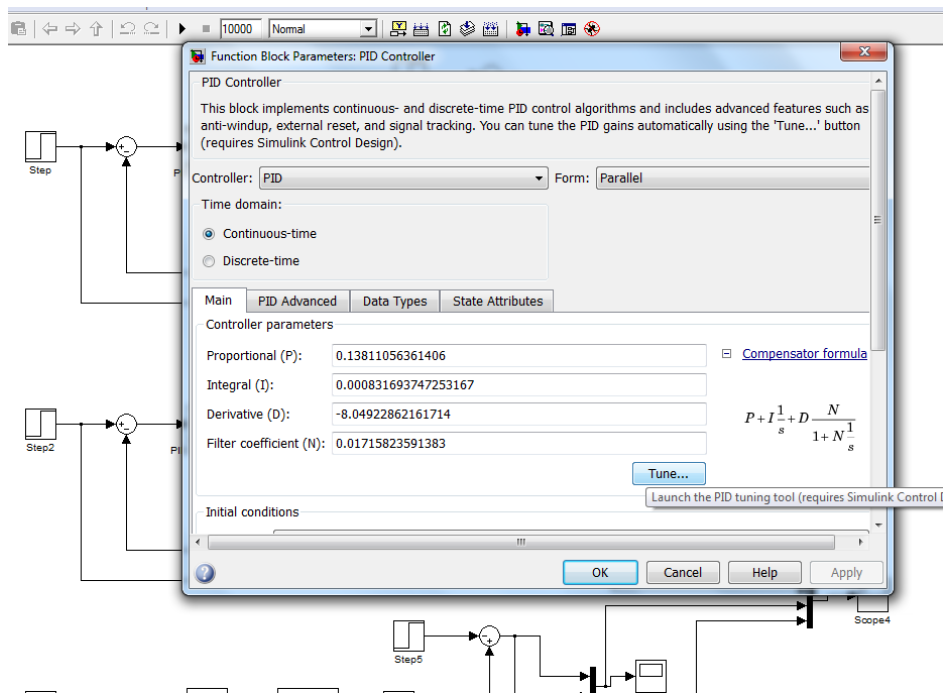


Figura 30. Pantalla de modificación de parámetros del control PID en Simulink (Autor)

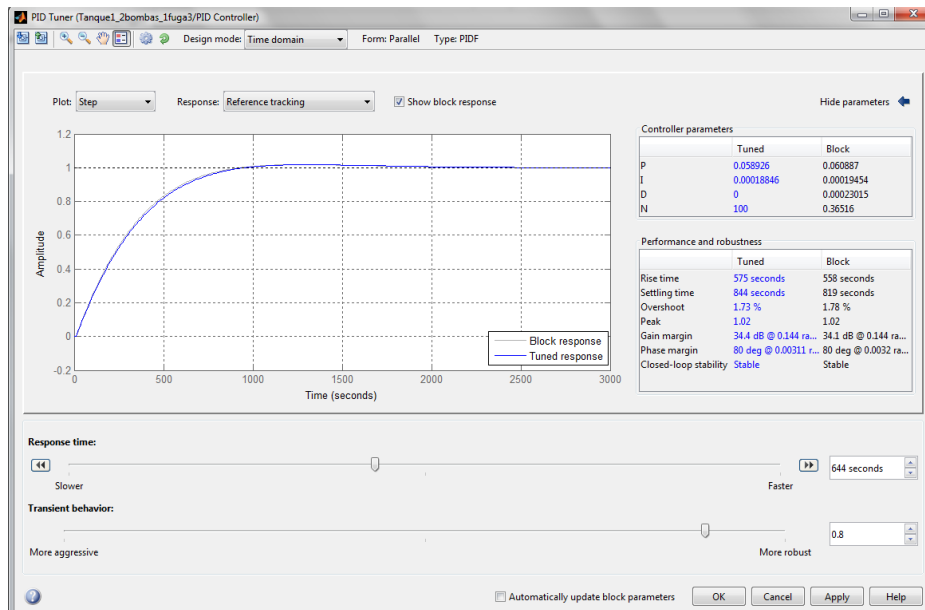


Figura 31. Interfaz de modificación de respuesta del control PID en Simulink (Autor)

Luego de realizar este procedimiento se procede a realizar la simulación del sistema a controlar en un tiempo (s) adecuado para observar toda la curva de control en el visor de señales de Simulink (Figura 32).

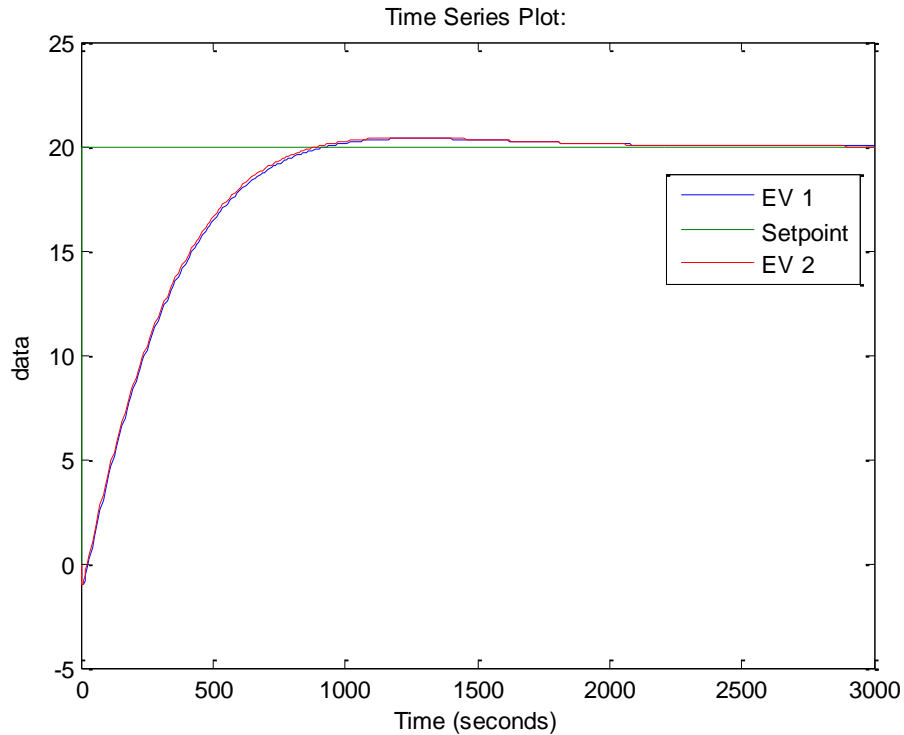


Figura 32. Resultado de la Simulación en Simulink de la variación del nivel utilizando control PID en el Tanque 1 (Autor)

#### 4. Implementación del control PID

Con los parámetros obtenidos en Simulink mediante el paso anterior se programa los nuevos VIs en LabVIEW (Figura 35) con el bloque PID(Figura 36) para que el control de las electroválvulas se realice de forma automática (Figura 33), El diagrama de todo el proceso de identificación y programación está explicado en la figura 34.

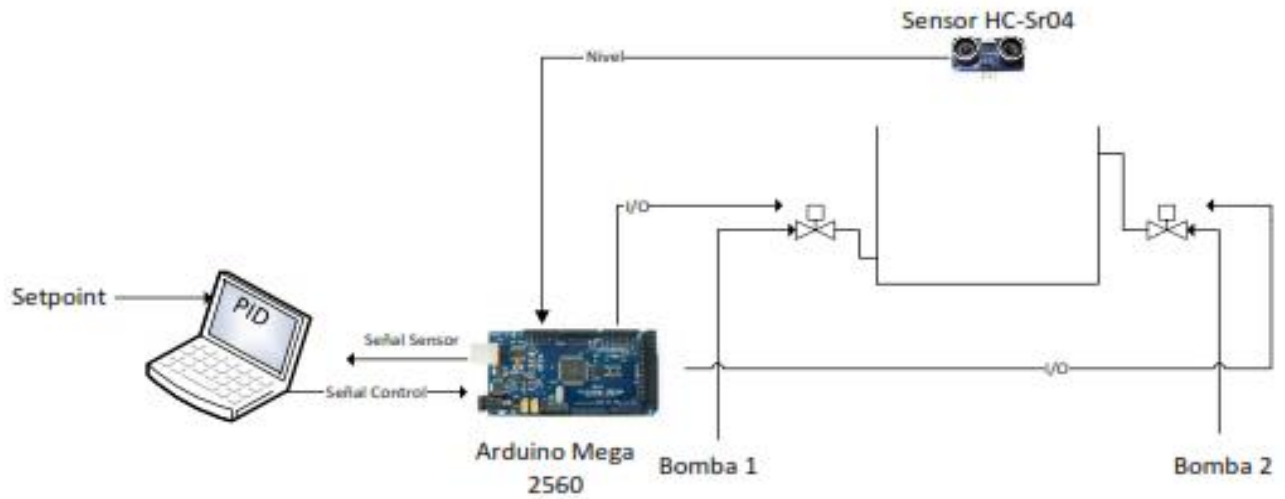


Figura 33. Diagrama del proceso controlado por PID en un solo tanque (Autor)

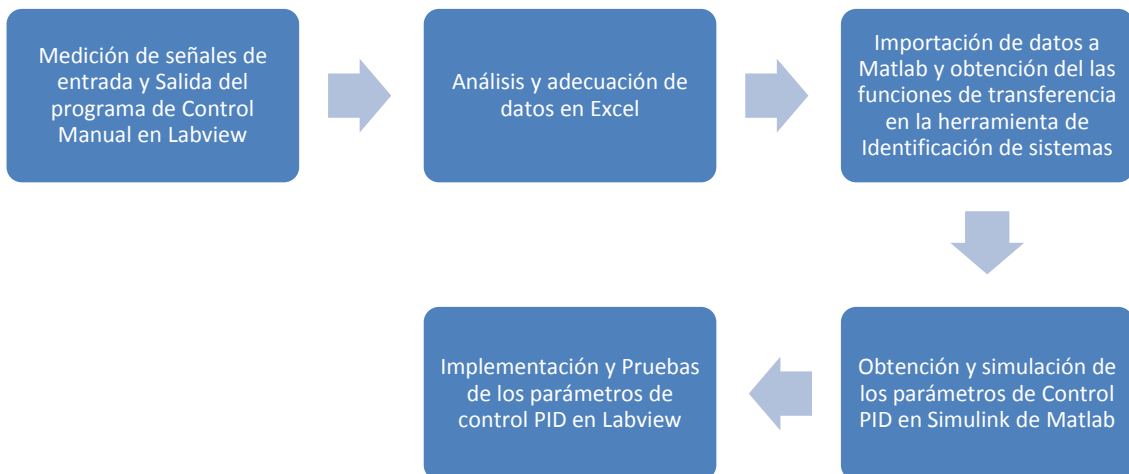


Figura 34. Diagrama de proceso de identificación de sistemas y desarrollo del controlador PID (Autor)

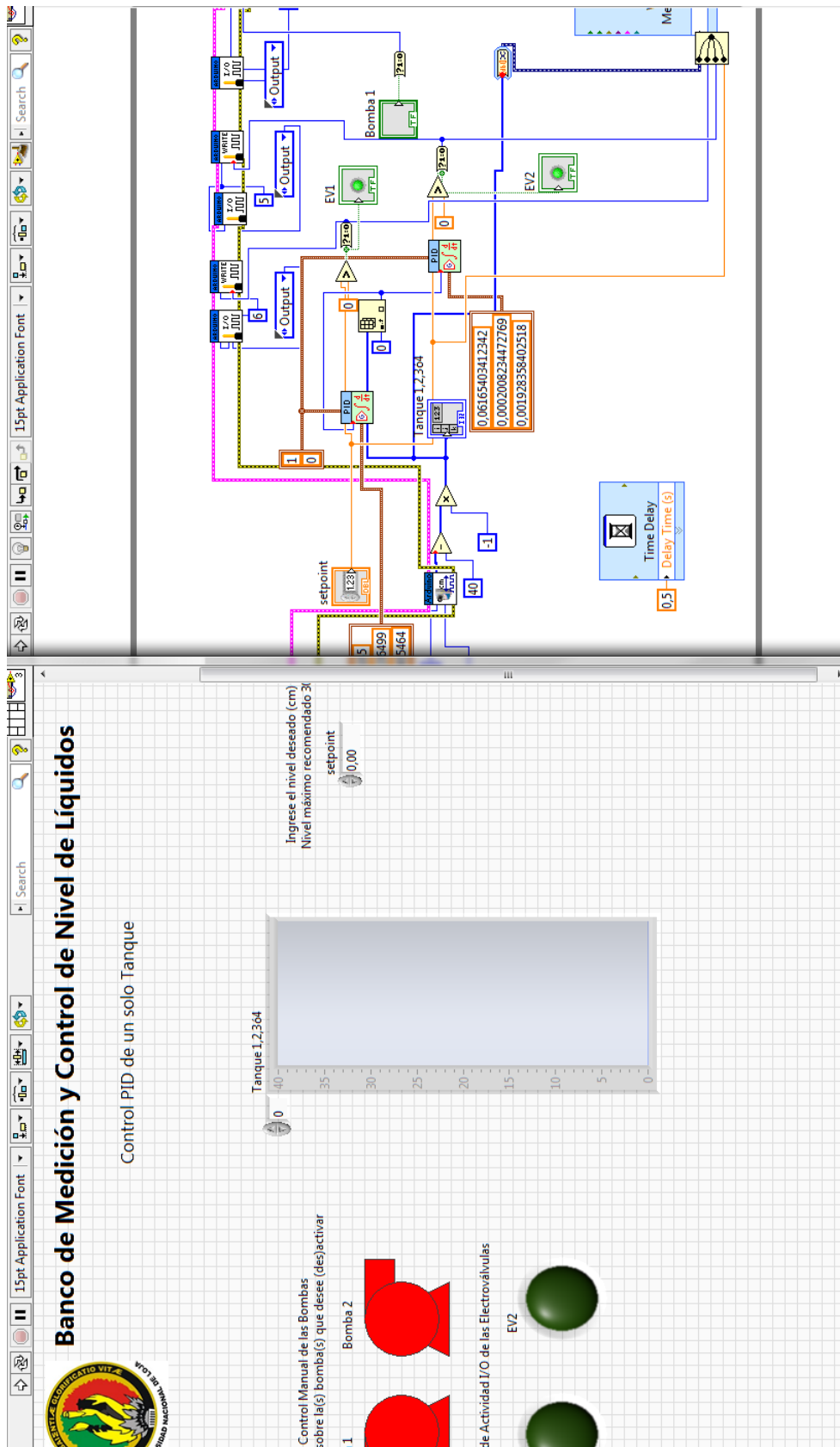


Figura 35. Captura de pantalla del programa de control PID de un solo y su diagrama de bloques a pantalla dividida (Autor)

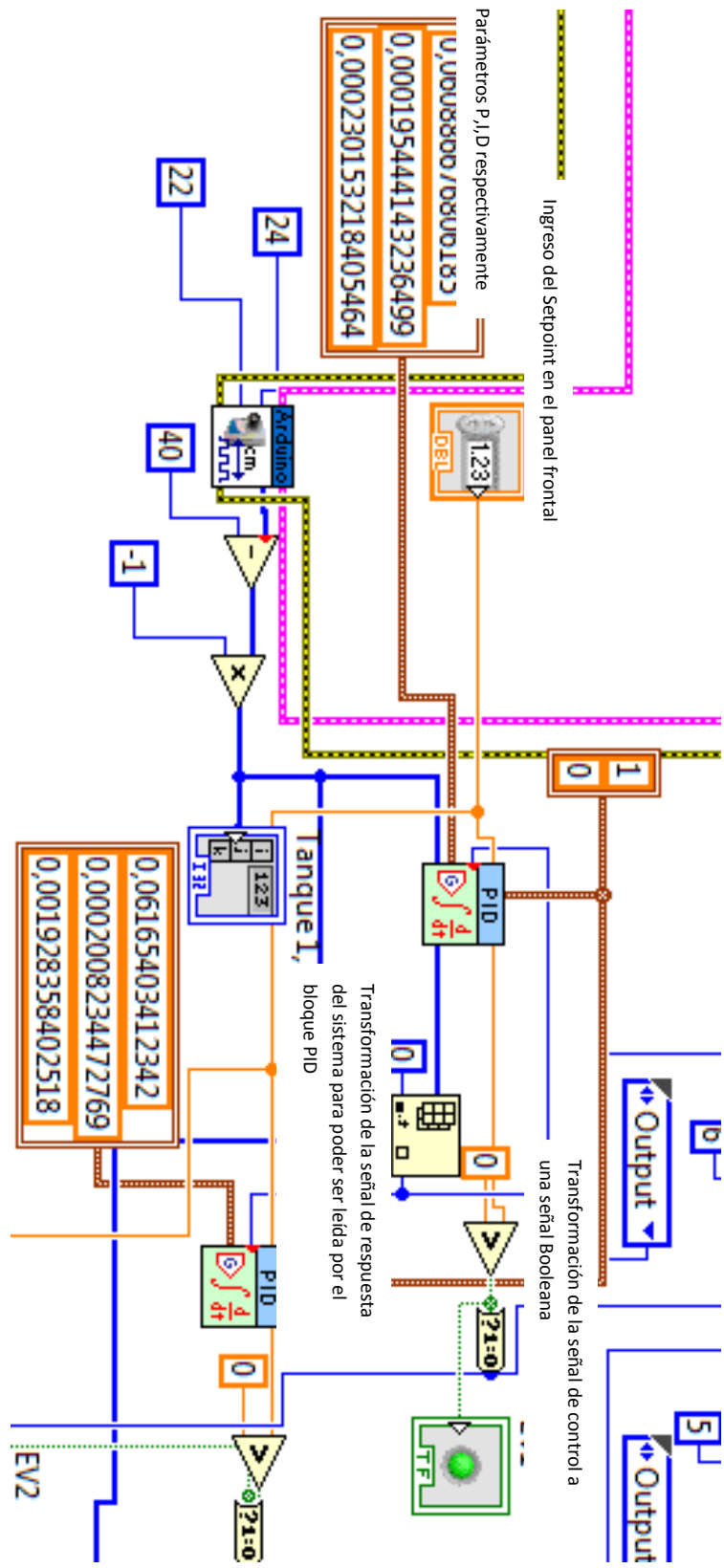


Figura 36. Bloque PID de Labview (Autor)

## f.- RESULTADOS

### f.1. Modelos Obtenidos

En el banco se realizó distintas pruebas para obtener los modelos específicos de cada situación.

- Modelo de llenado de un solo tanque

Tomando en cuenta que se tiene 2 entradas (2 electroválvulas) y una salida (el nivel del tanque) (figura 37) se tiene 2 funciones de transferencia

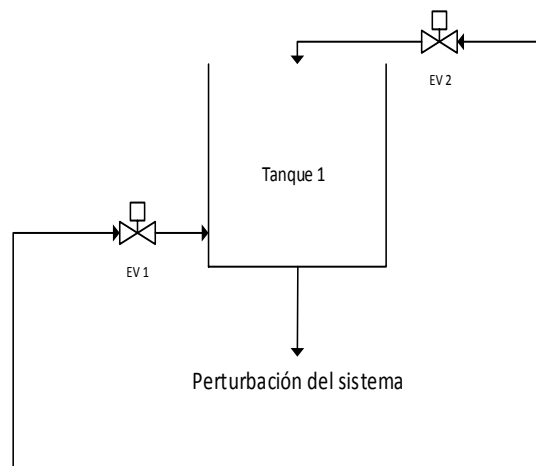


Figura 37. Esquema del sistema de 1 tanque (Autor)

$$G_1(s) = \frac{Kp_1}{1+Tp_1*s} * e^{-Td_1*s} \quad (36)$$

$$G_2(s) = \frac{Kp_2}{1+Tp_2*s} * e^{-Td_2*s} \quad (37)$$

En donde:

	<b>G1</b>	<b>G2</b>
<b>Kp</b>	19.3	19.3
<b>Tp</b>	415	415.41
<b>Td</b>	10.871	7.871

Tabla 1. Datos de los valores de las constantes de las funciones de transferencia 11 y 12 (Autor)

Los modelos obtenidos tienen un 90,15% de precisión frente a los datos medidos y estos modelos pueden ser aplicados en cada uno de los tanques independientemente (Figura 38) además se puede apreciar una estabilidad en la respuesta a la señal escalón (cada una correspondiente a cada entrada) (Figura 39), se observa además la inexistencia de ceros y la obtención de polos negativos que por ende significan que es un sistema estable (Figura 40).

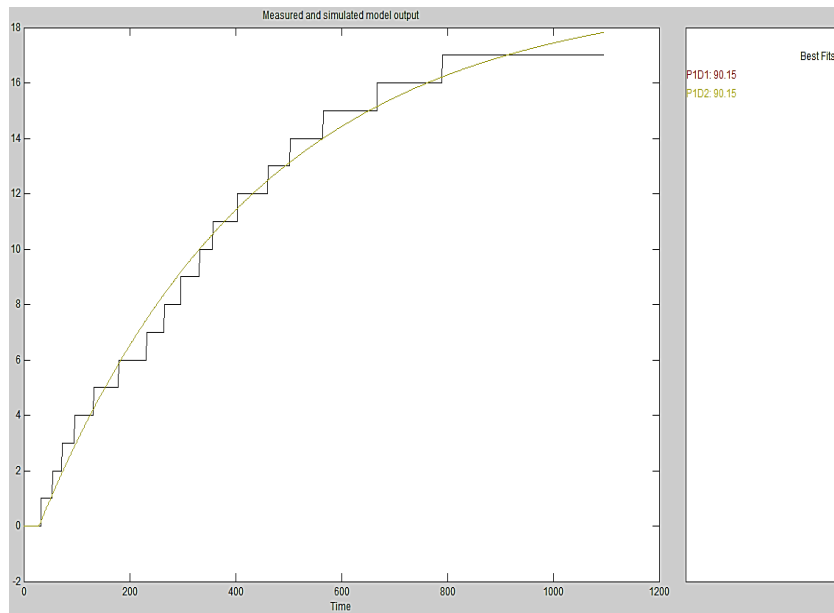


Figura 38. Comparación de la medición y la salida del modelo de un solo tanque (Autor)

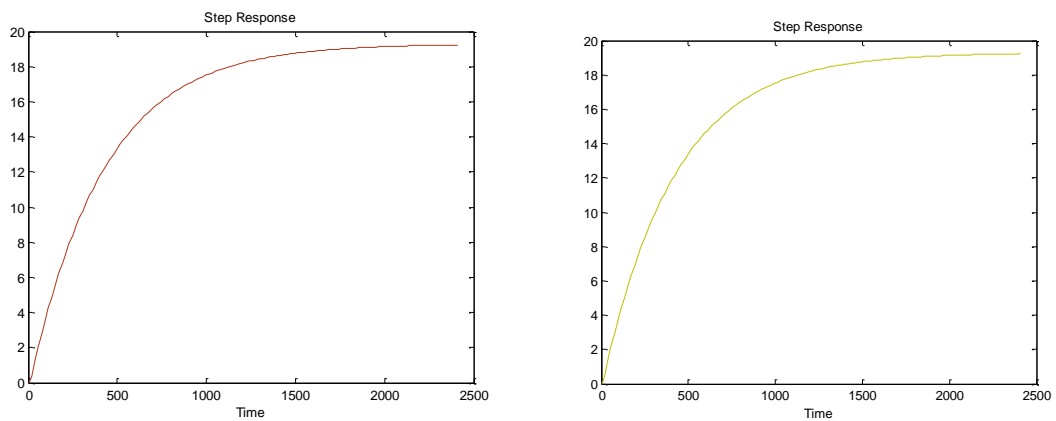


Figura 39. Respuesta a la señal de escalón (Autor)



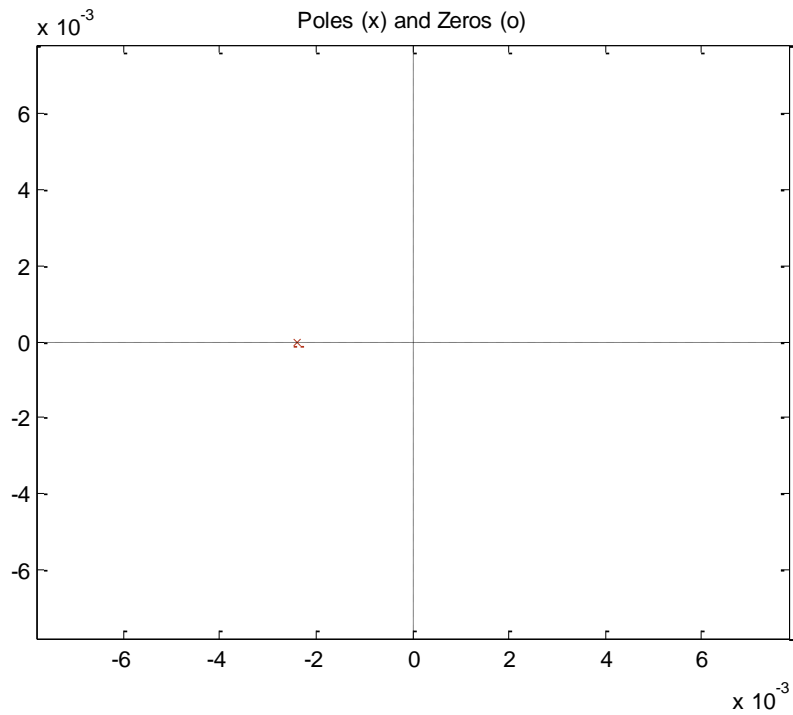


Figura 40. Diagrama de Polos y ceros (Autor)

- Modelo de llenado de sólo dos tanques en conexión horizontal

Para este proceso se obtuvo 4 funciones de transferencia debido a que se tiene 4 entradas y dos salidas (Figura 41).

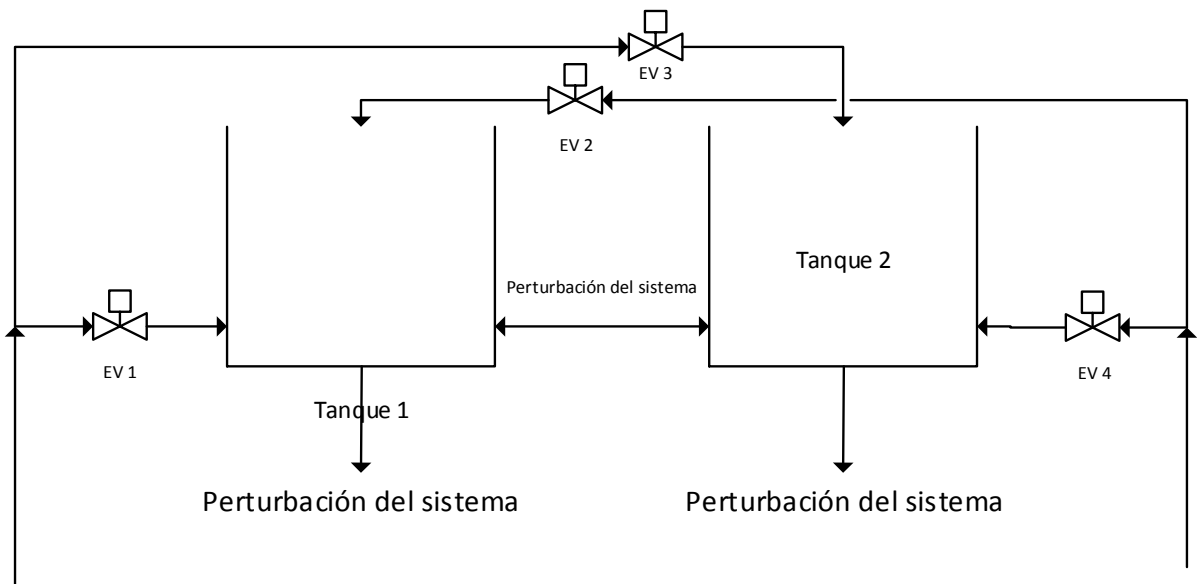


Figura 41 Esquema del sistema de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

$$G_1(s) = \frac{Kp_1}{1+Tp_1*s} * e^{(-Td_1*s)} \quad (38)$$

$$G_2(s) = \frac{Kp_2}{1+Tp_2*s} * e^{(-Td_2*s)} \quad (39)$$

$$G_3(s) = \frac{Kp_3}{1+Tp_3*s} * e^{(-Td_3*s)} \quad (40)$$

$$G_4(s) = \frac{Kp_4}{1+Tp_4*s} * e^{(-Td_4*s)} \quad (41)$$

En donde:

	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>G4</b>
<b>Kp</b>	31,792	31,792	33,404	33,404
<b>Tp</b>	642,21	642,21	866,23	866,23
<b>Td</b>	0	0	0	0

Tabla 2. Datos de los valores de las constantes de las funciones de transferencia 13 a 16 (Autor)

Los modelos obtenidos de cada tanque tienen un 94.86% y 93.59% de precisión respectivamente (Figura 42) y se puede observar una estabilidad en la respuesta a la señal escalón (Figura 43) así como la ausencia de ceros y la obtención de polos negativos que nos brindan un sistema estable(Figura 44).

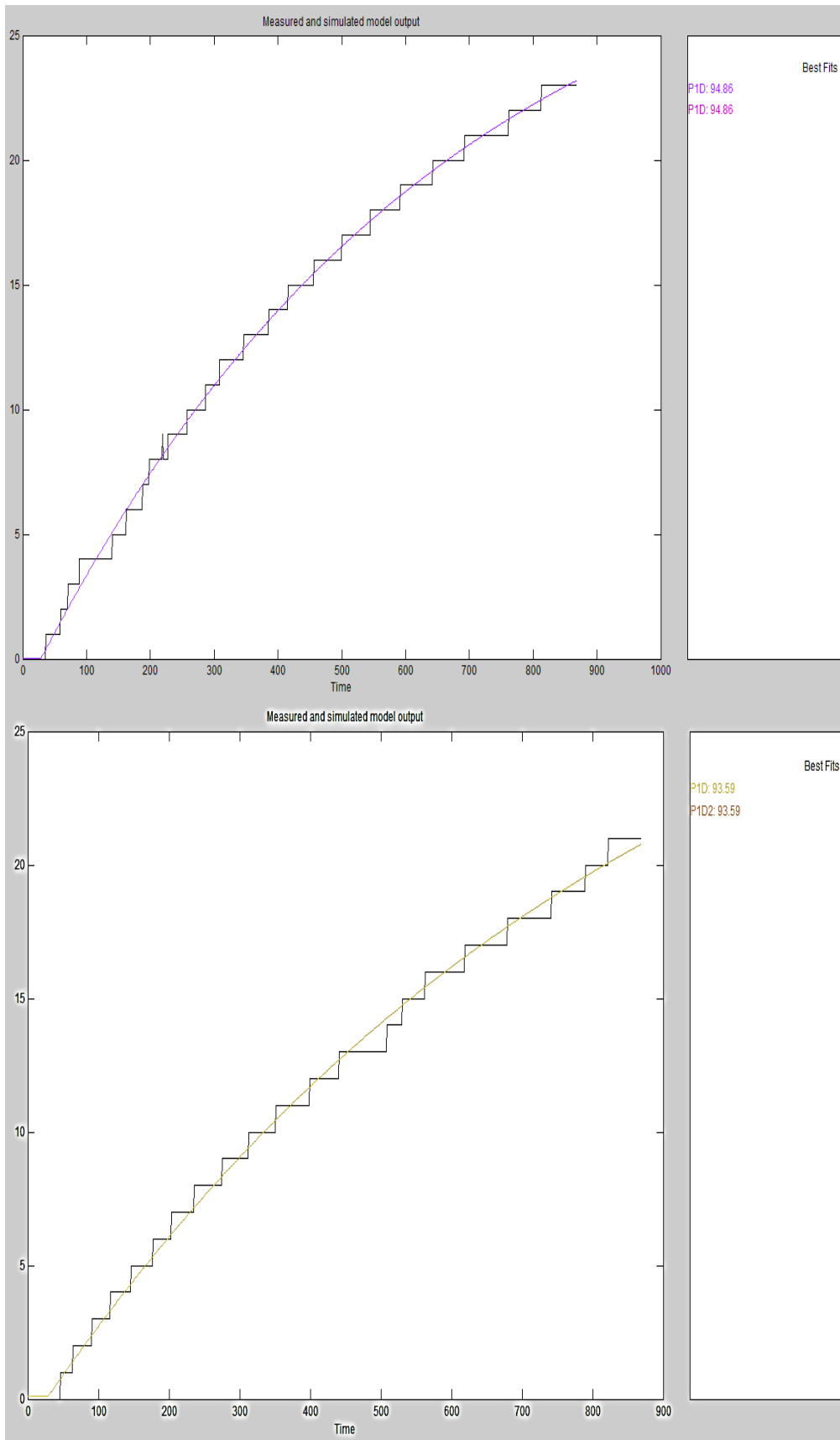


Figura 42. Comparación de la medición y la salida del modelo de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

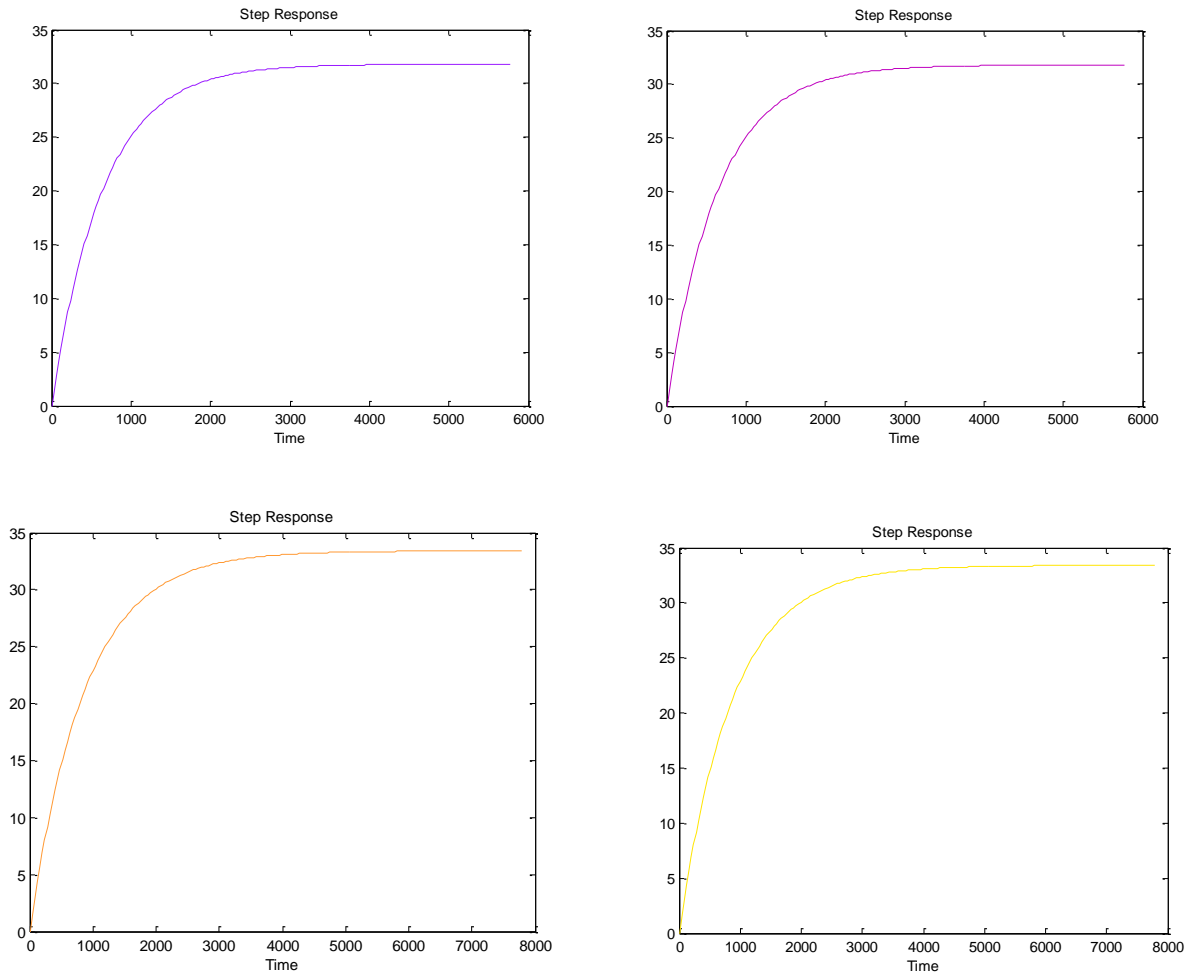


Figura 43. Respuesta de la señal de escalón tanques 1(arriba) y 2(abajo) (Autor)

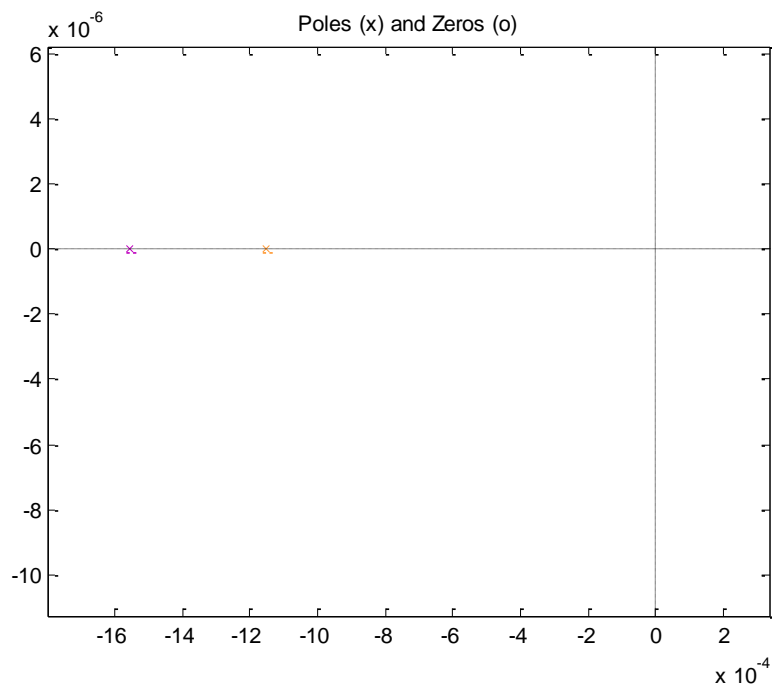


Figura 44. Diagrama de Polos y ceros (Autor)

- Modelo de llenado de sólo dos tanques en conexión vertical

Para este proceso se obtuvo 4 funciones de transferencia debido a que se tiene 4 entradas y dos salidas (figura 45).

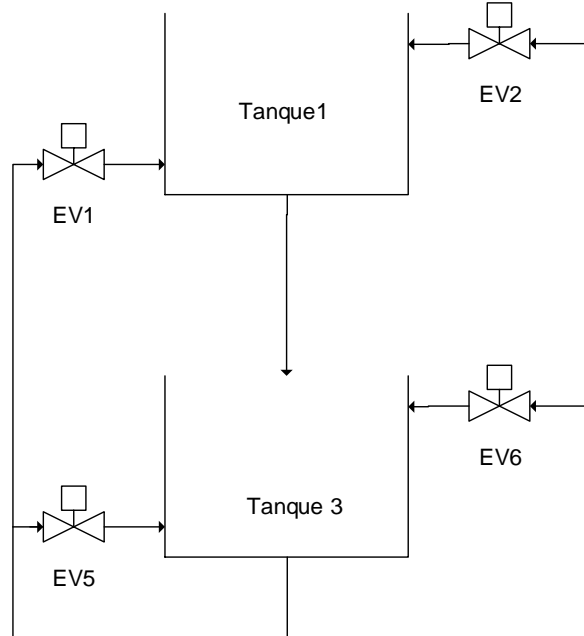


Figura 45. Sistema de tanques conectado de manera vertical (Autor)

$$G_1(s) = \frac{Kp_1}{1+Tp_1*s} * e^{-Td_1*s} \quad (42)$$

$$G_2(s) = \frac{Kp_2}{1+Tp_2*s} * e^{-Td_2*s} \quad (43)$$

$$G_3(s) = \frac{Kp_3}{1+Tp_3*s} * e^{-Td_3*s} \quad (44)$$

$$G_4(s) = \frac{Kp_4}{1+Tp_4*s} * e^{-Td_4*s} \quad (45)$$

En donde:

	G1	G2	G3	G4
Kp	14,272	14,272	120,16	120,16
Tp	480,97	480,97	1439.7	1439.7
Td	0	0	0	0

Tabla 3. Datos de los valores de las constantes de las funciones de transferencia 17 a 20 (Autor)

Los modelos obtenidos de cada tanque tienen un 85,81% y 96,96% de precisión respectivamente (Figura 46) y se tiene una curva estable en la respuesta transitoria a la señal escalón (Figura 47) no se tiene ceros y la ubicación de los polos comprueban que se trata de un sistema estable (Figura 48).

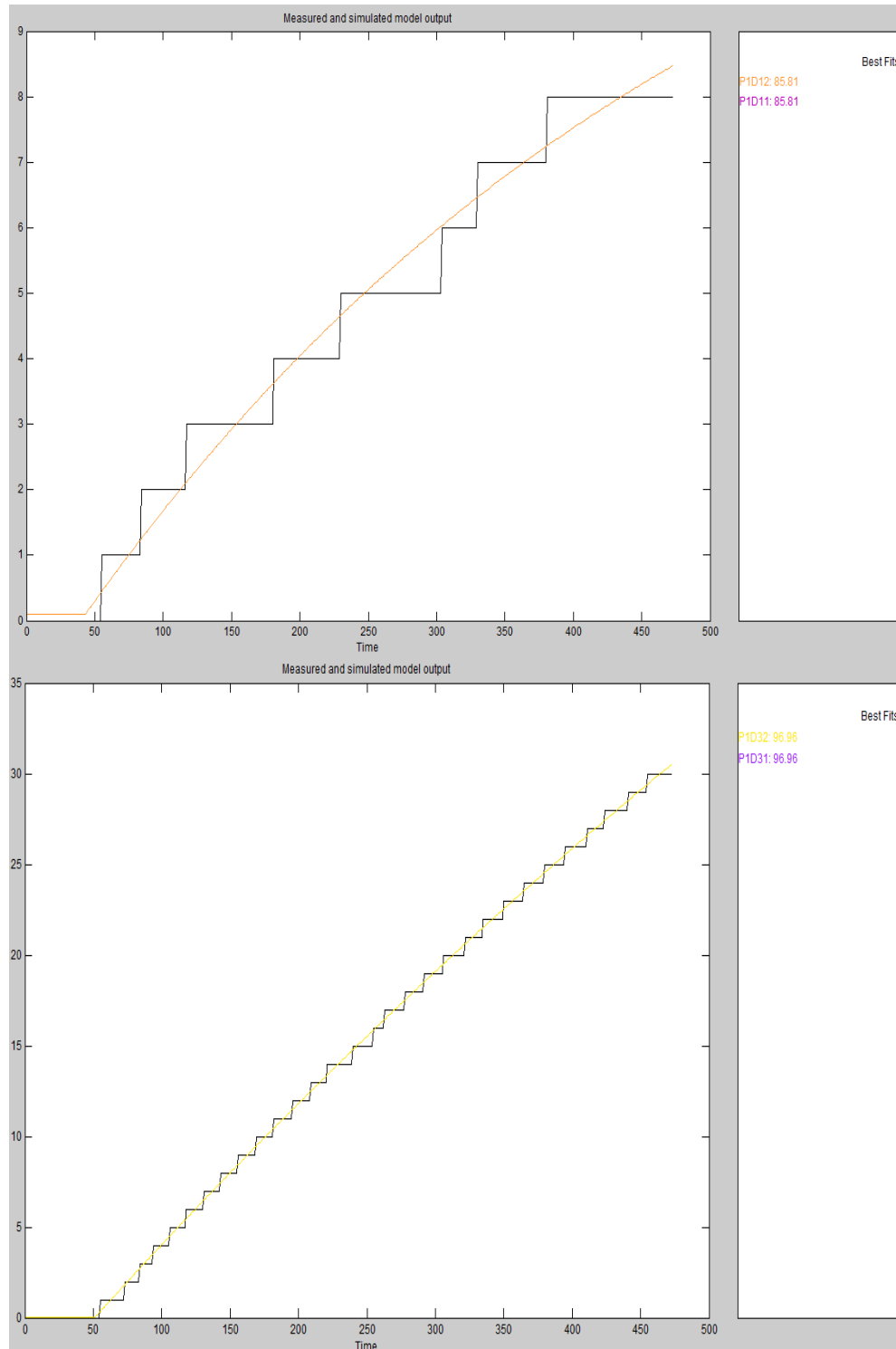


Figura 46. Comparación de la medición y la salida del modelo de dos tanques en conexión vertical (Autor)

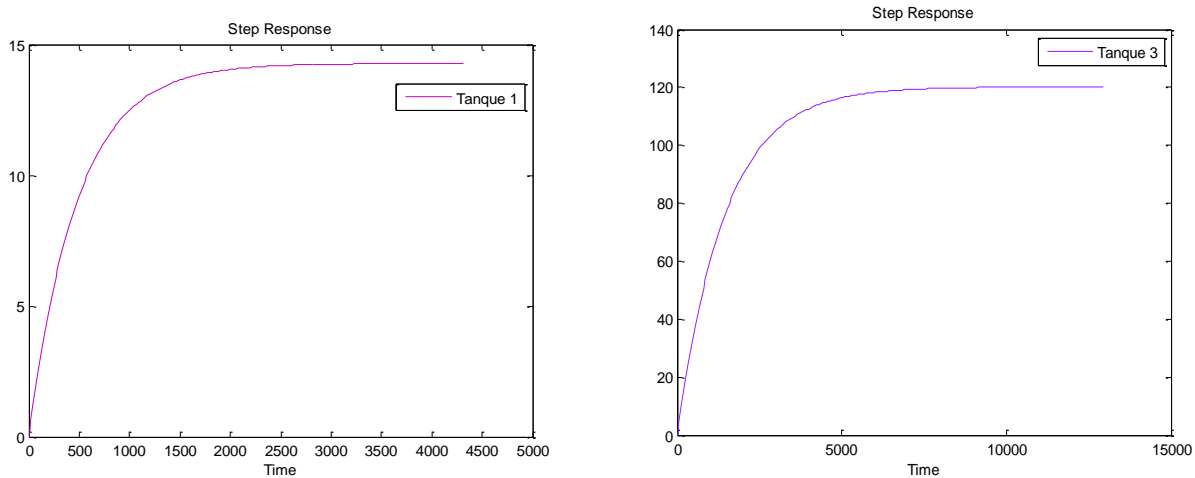


Figura 47. Respuesta de la señal de escalón (Autor)

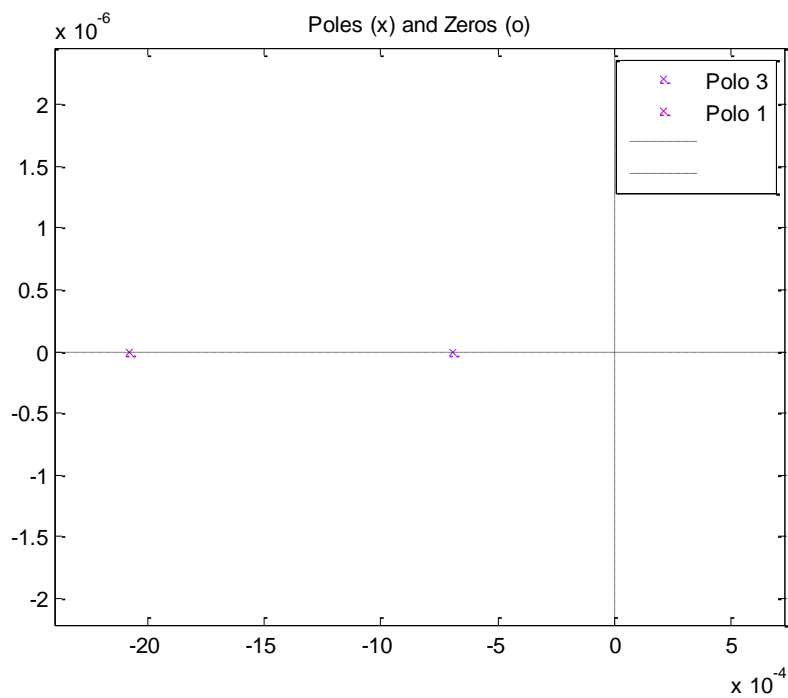


Figura 48. Diagrama de polos y Ceros (Autor)

- Modelo de llenado de todos los tanques al mismo tiempo

Para este proceso se obtuvo 4 funciones de transferencia debido a que se tiene 4 entradas (una sola por las 2 electroválvulas que alimentan cada tanque) y 4 salidas (figura 49, Anexo de Diagrama de Flujo de Proceso)

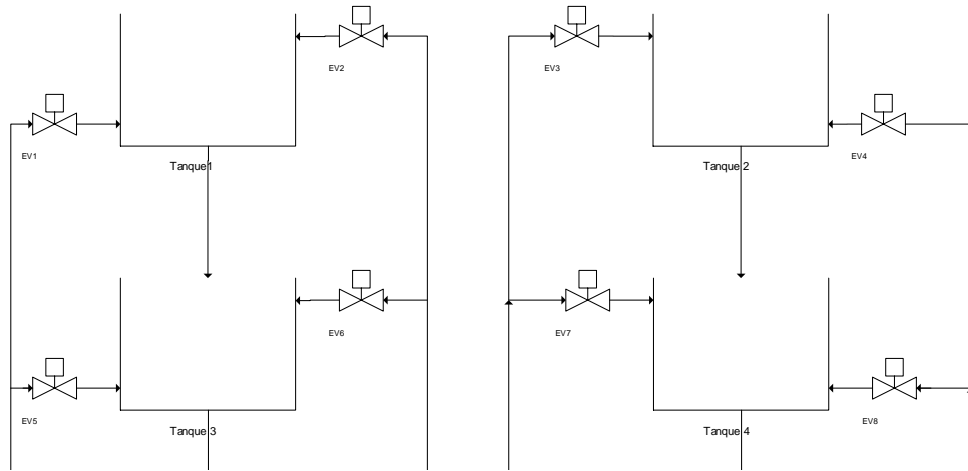


Figura 49. Esquema del sistema de los 4 tanques (Autor)

$$G_1(s) = \frac{Kp_1}{1+Tp_1*s} * e^{(-Td_1*s)} \quad (46)$$

$$G_2(s) = \frac{Kp_2}{1+Tp_2*s} * e^{(-Td_2*s)} \quad (47)$$

$$G_3(s) = \frac{Kp_3}{1+Tp_3*s} * e^{(-Td_3*s)} \quad (48)$$

$$G_4(s) = \frac{Kp_4}{1+Tp_4*s} * e^{(-Td_4*s)} \quad (49)$$

- En donde:

	G1	G2	G3	G4
Kp	9.5469	9.8577	56.763	59.646
Tp	280.93	305.45	814.28	1033.7
Td	1	1	1	1

Tabla 4. Datos de los valores de las constantes de las funciones de transferencia 21 a 24 (Autor)

Los modelos obtenidos de cada tanque tienen un 87.28%, 87.81%, 94.79% y 92.84% de precisión respectivamente (Figuras 50 y 51) la respuesta a la señal escalón en cada uno de los tanques es estable(Figura 52) no existen ceros en el sistema y los polos son raíces negativas reales que nos indican que el sistema es estable (Figura 53).



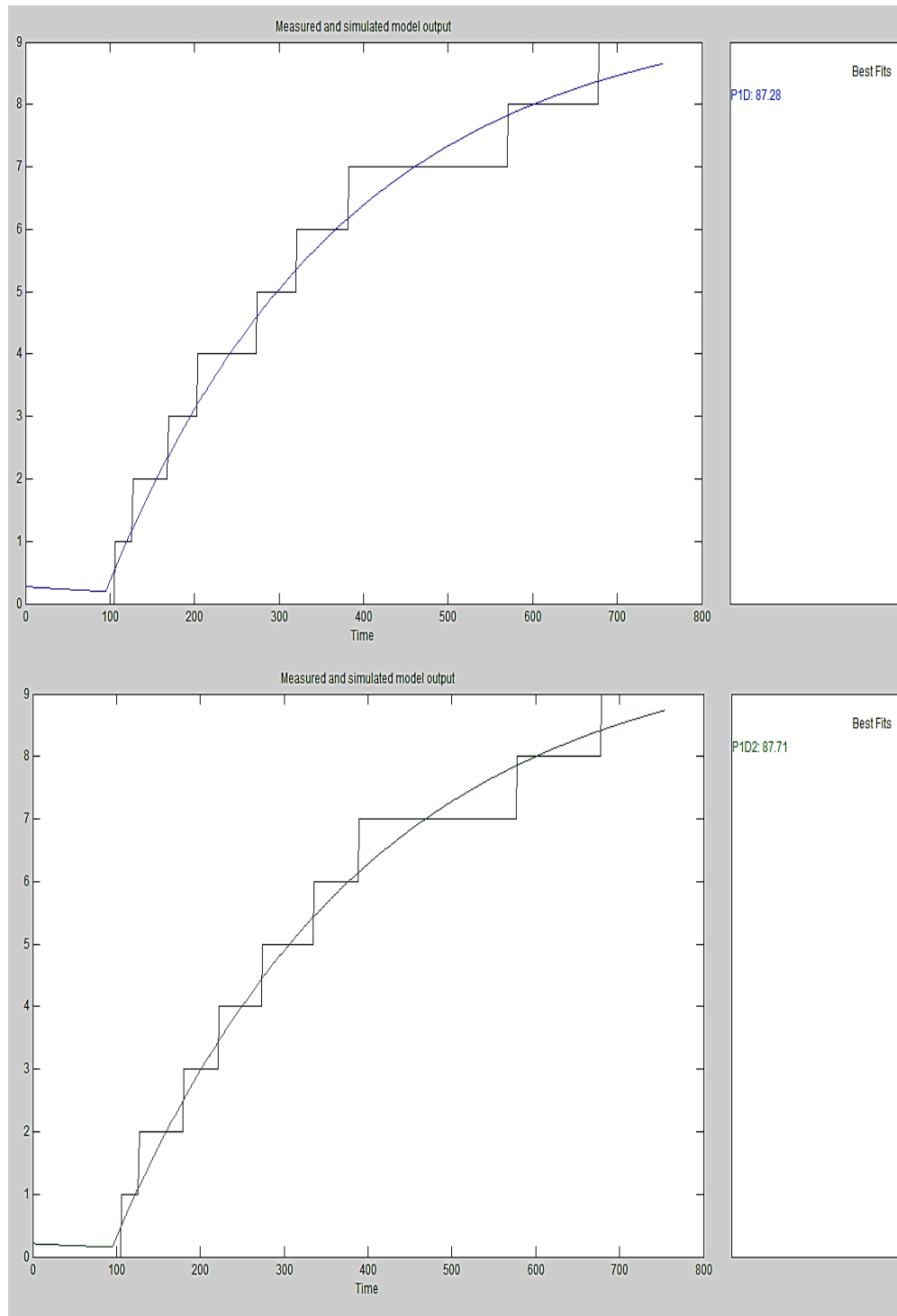


Figura 50. Comparación de la medición y la salida del modelo de 4 tanques, tanques 1 y 2 (Autor)

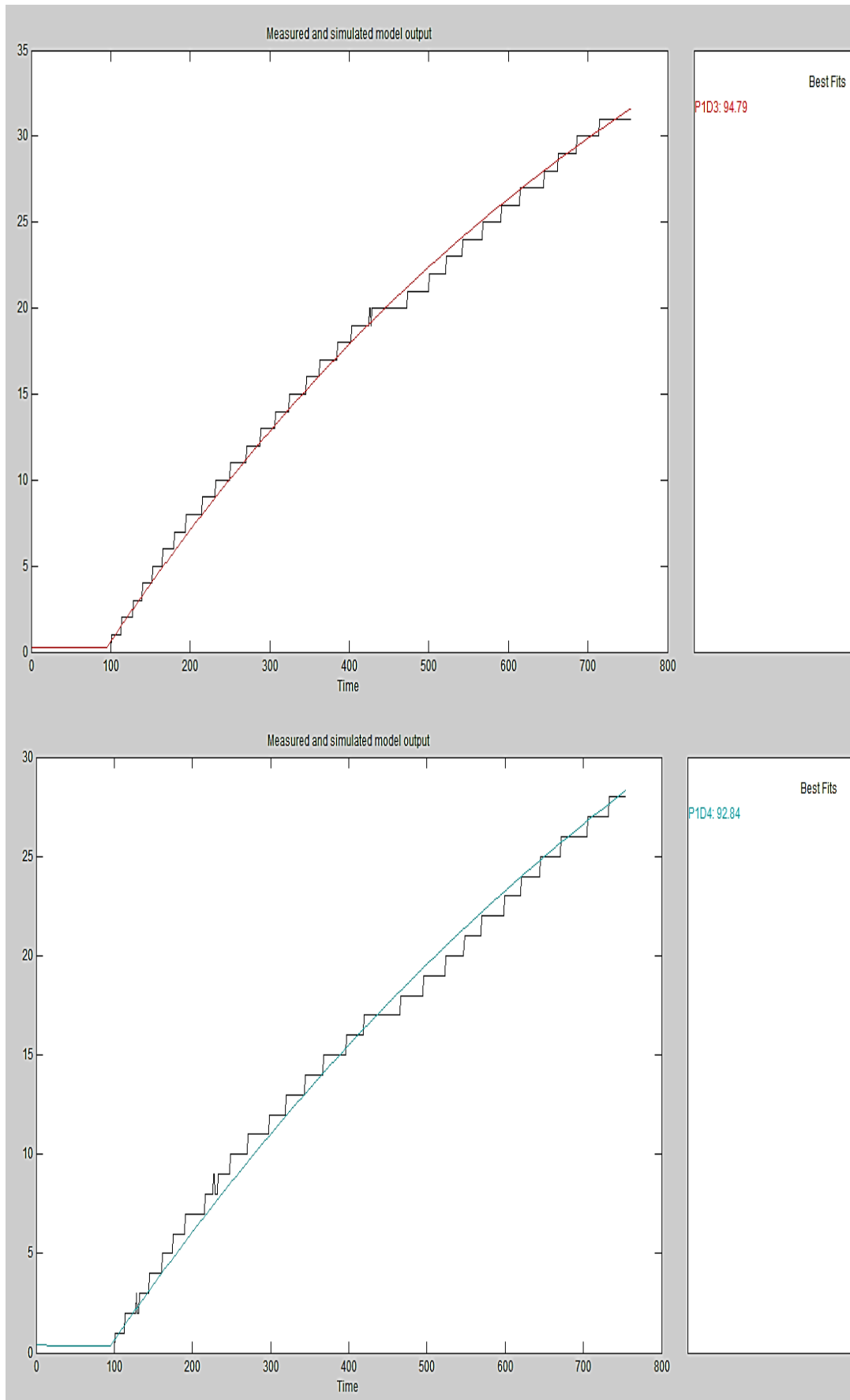


Figura 51. Comparación de la medición y la salida del modelo de 4 tanques, tanques 3 y 4 (Autor)

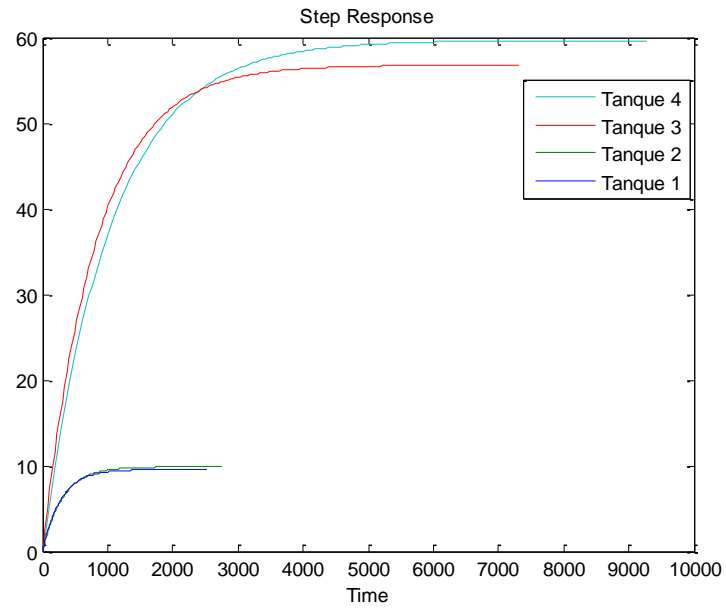


Figura 52. Respuesta de la señal escalón en los 4 tanques (Autor)

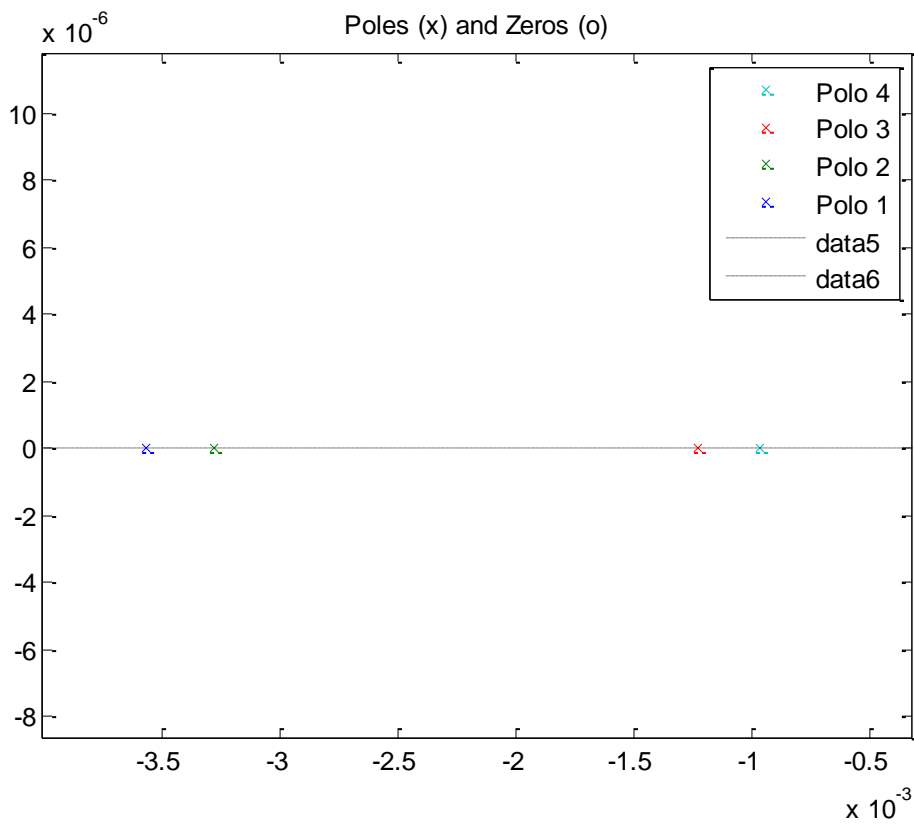


Figura 53. Diagrama de polos y Ceros (Autor)

## f.2. PID Desarrollados

- PID para un solo tanque

Aplicando los pasos descritos en la metodología se obtuvo los siguientes parámetros para el bloque PID (figura 32).

	Electroválvula 1	Electroválvula 2
P	0,060886676806185	0,06165403412342
I	0,000195444143236499	0,0002008234472769
D	0,000230153218405464	0,001928358402518

Tabla 5. Datos de los valores de las constantes Proporcional, Integral y Derivativa aplicadas para el PID de un solo tanque (Autor)

- PID para 2 tanques conectados horizontalmente

En este caso las electroválvulas de cada tanque están conectadas a un bloque PID cada una y por lo tanto ambas usan los mismos parámetros (figura 54).

	Tanque 1	Tanque 2
P	0,0734648577310993	0,226334616238083
I	0,000217489525121401	0,000557026631111255
D	-0,062200596882937	0,00205670022300796

Tabla 6. Datos de los valores de las constantes Proporcional, Integral y Derivativa aplicadas para el PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

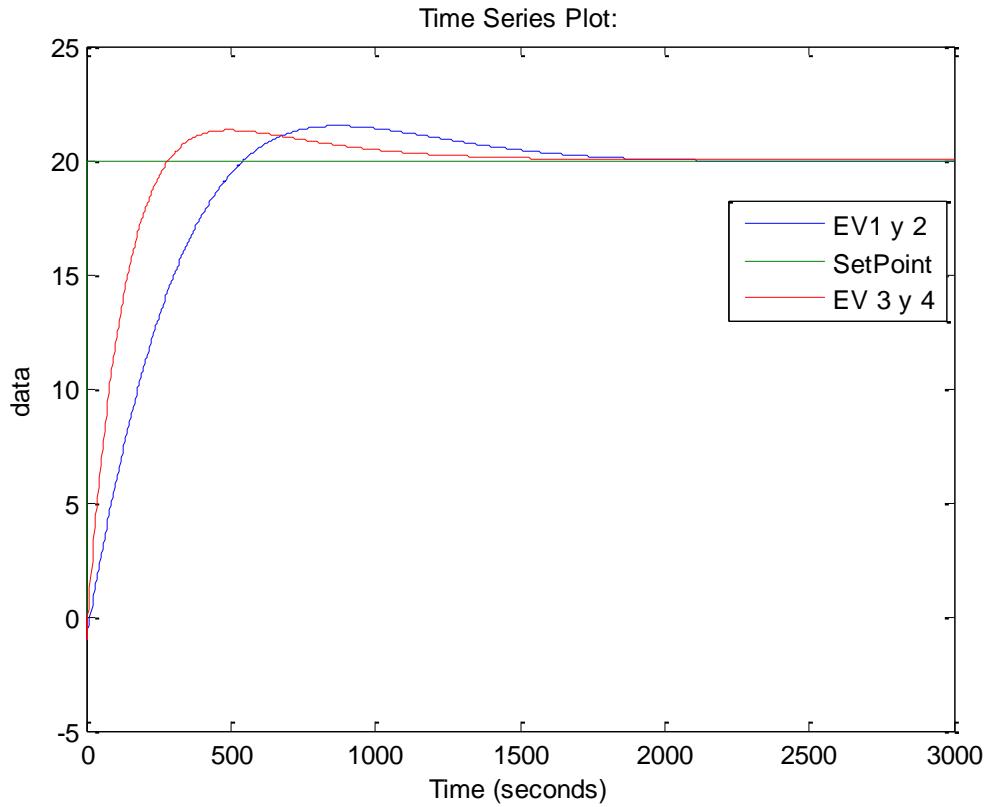


Figura 54. Simulación de la salida de los Bloques PID en Simulink de 2 tanques conectados horizontalmente (Autor).

- PID para 2 tanques conectados verticalmente

En esta situación también se obtuvo 2 bloques PID por tanques aplicados individualmente a cada válvula según corresponde.

	<b>Tanque 1</b>	<b>Tanque 3</b>
<b>P</b>	0,0771267225060618	0,139479471745733
<b>I</b>	0,000191162152409681	0,000302010524167298
<b>D</b>	0,0088513691383652	0,00517624246534268

Tabla 7. Datos de los valores de las constantes Proporcional, Integral y Derivativa aplicadas para el PID de un solo tanque (Autor)

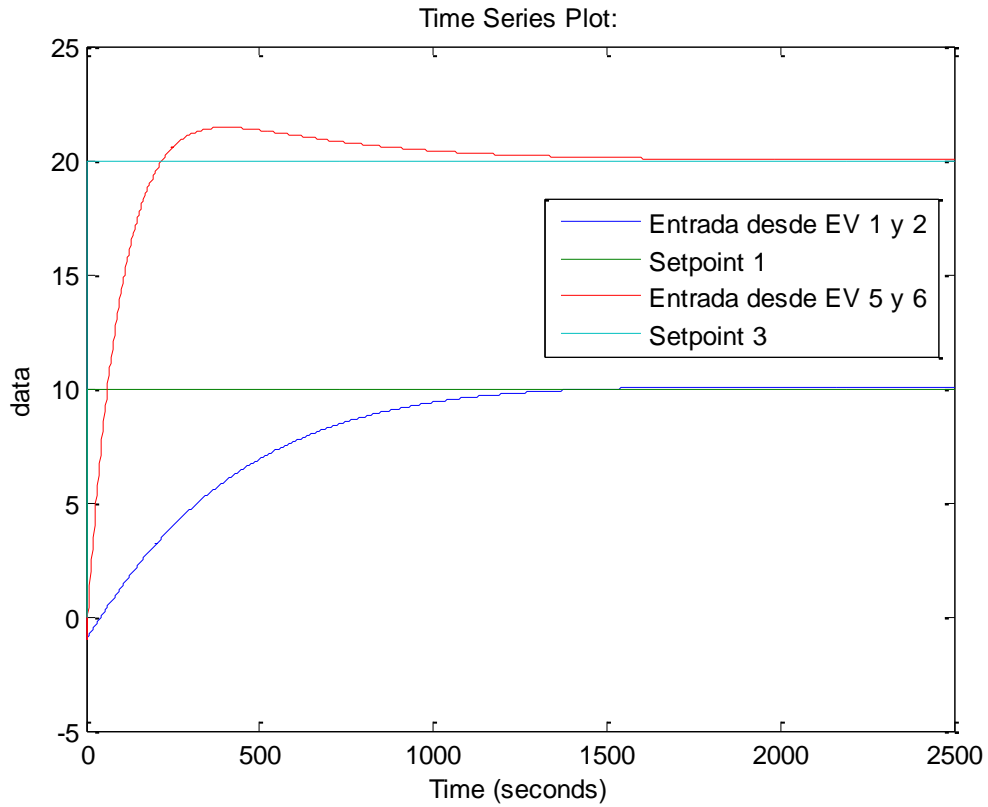


Figura 55. Simulación en Simulink de la variación de nivel de 2 tanques conectados verticalmente utilizando los controladores PID obtenidos (Autor).

- PID para todos los tanques

En este caso se obtuvo 4 bloques PID uno por cada tanque (figura 56).

	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4
<b>P</b>	0,11478404080022	0,111280403534345	0,04142191393735	0,03920934717525
<b>I</b>	4,83051878382577E-5	0,000431136253878396	9,652051913969E-5	7,216707950326E-5
<b>D</b>	0,014206147671829	0,0233587758079445	-0,007923897024448	-0,04933936856625

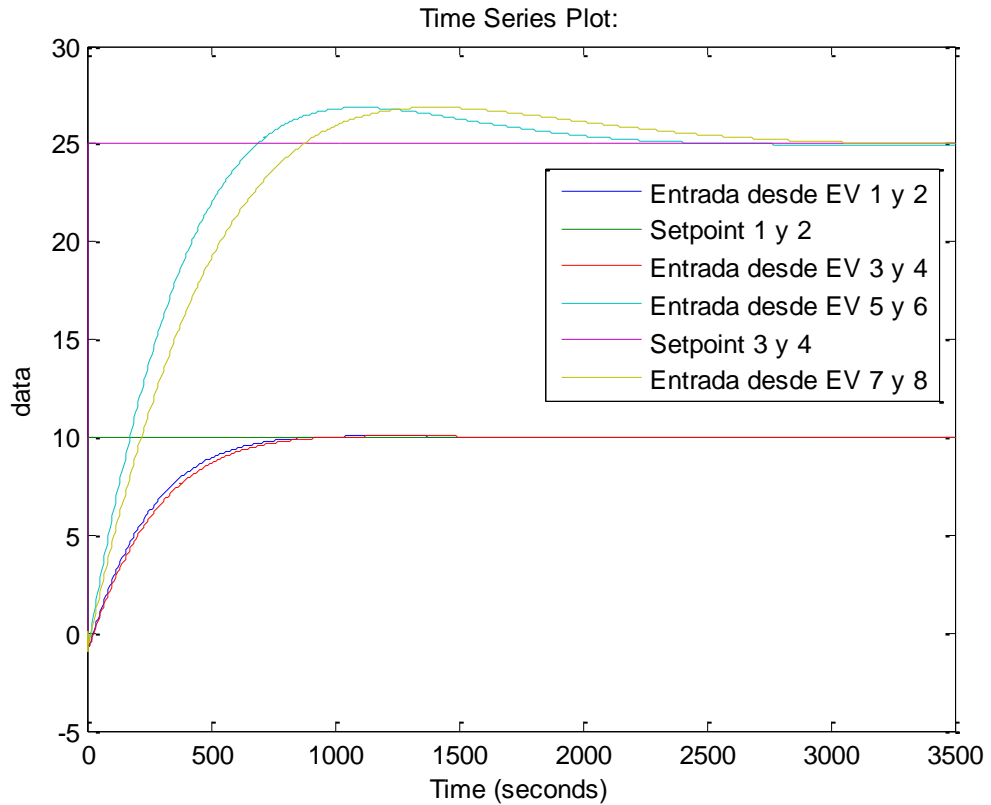


Figura 56. Simulación en Simulink de la variación de nivel de 4 tanques funcionando al mismo tiempo utilizando los controladores PID obtenidos (Autor).

### f.3. Aplicaciones PID Desarrolladas en Labview

Las aplicaciones de control fueron desarrolladas en Labview haciendo uso del bloque PID que posee esta aplicación acoplándolo junto con los bloques de control de Arduino para los que solamente hizo falta hacer unos ajustes para que el valor del nivel pueda entrar en el bloque PID ya que la salida del bloque del sensor es una matriz de orden 0 y el bloque PID necesita un valor escalar o de coma flotante de entrada y otro ajuste desde la salida de este bloque que compara el valor con 0 si este resulta mayor entonces enciende las electroválvulas (Figura 33).

Tomando en cuenta lo descrito todas las aplicaciones son ampliaciones de la aplicación de 1 solo tanque (Figuras 57 hasta 64). Se tiene además las gráficas del resultado de cada uno de los procesos de control PID (Figuras 65 a 72).

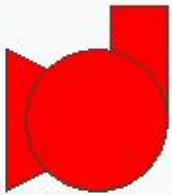


# Banco de Medición y Control de Nivel de Líquidos

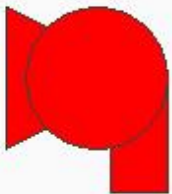
Control PID de un solo Tanque

Control Manual de las Bombas  
Haga click sobre la(s) bomba(s) que desee (des)activar

Bomba 1



Bomba 2



Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas

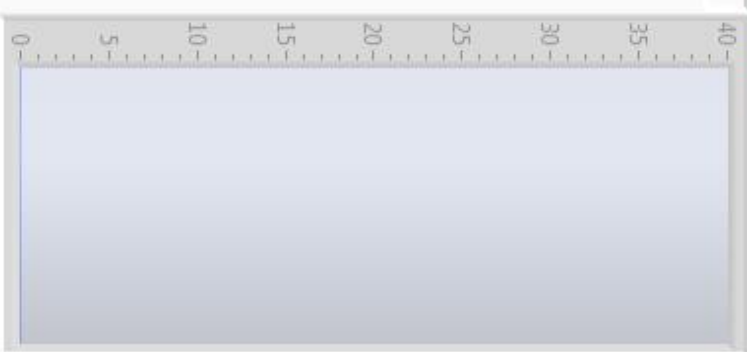
EV1



EV2



Tanque 1,2,3,6,4



Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 30

setpoint

0,00

STOP

Figura 57. Panel frontal de Labview del Control PID de un solo tanque (Autor).



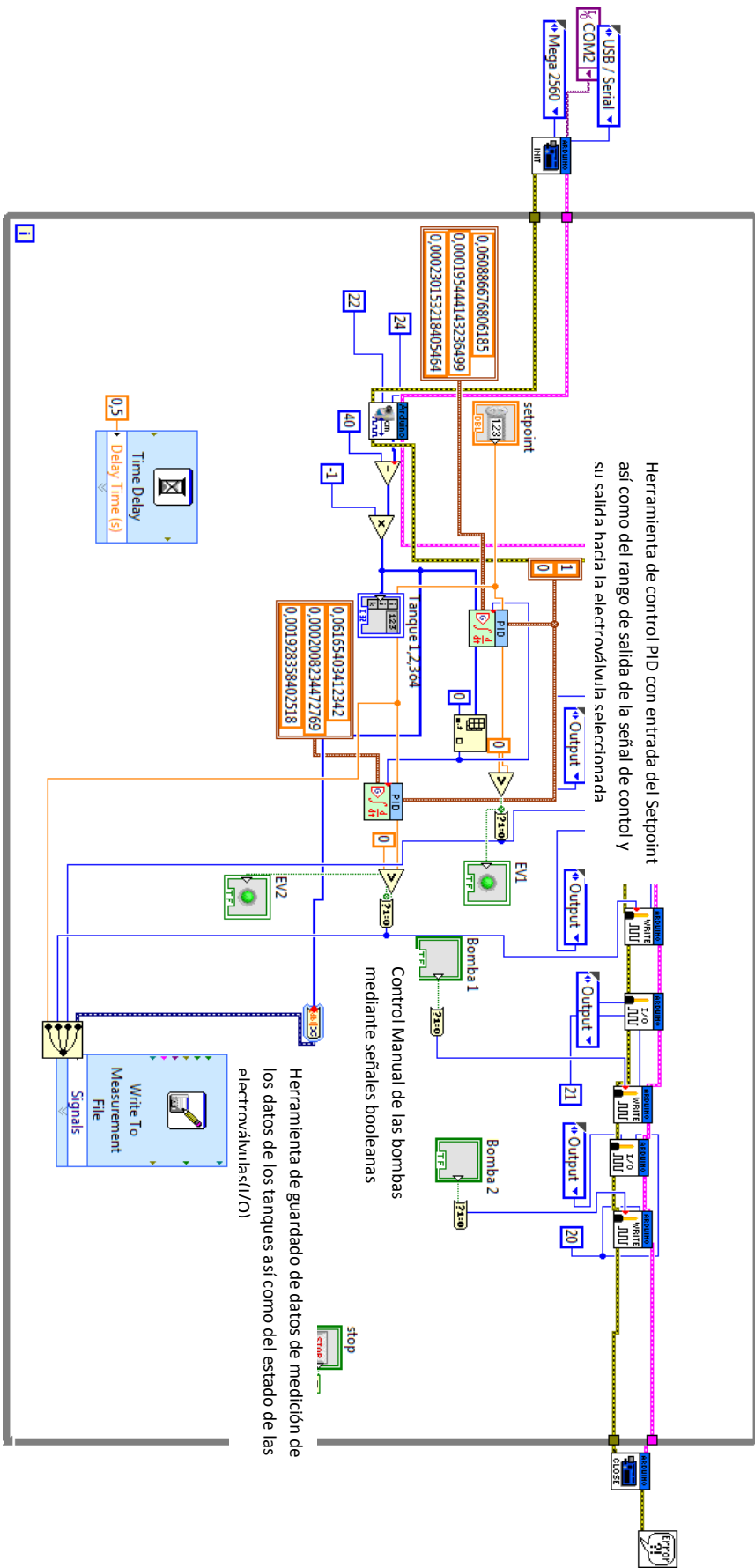


Figura 58. Diagrama de Bloques de Labview del control PID del tanque 1 (Autor).

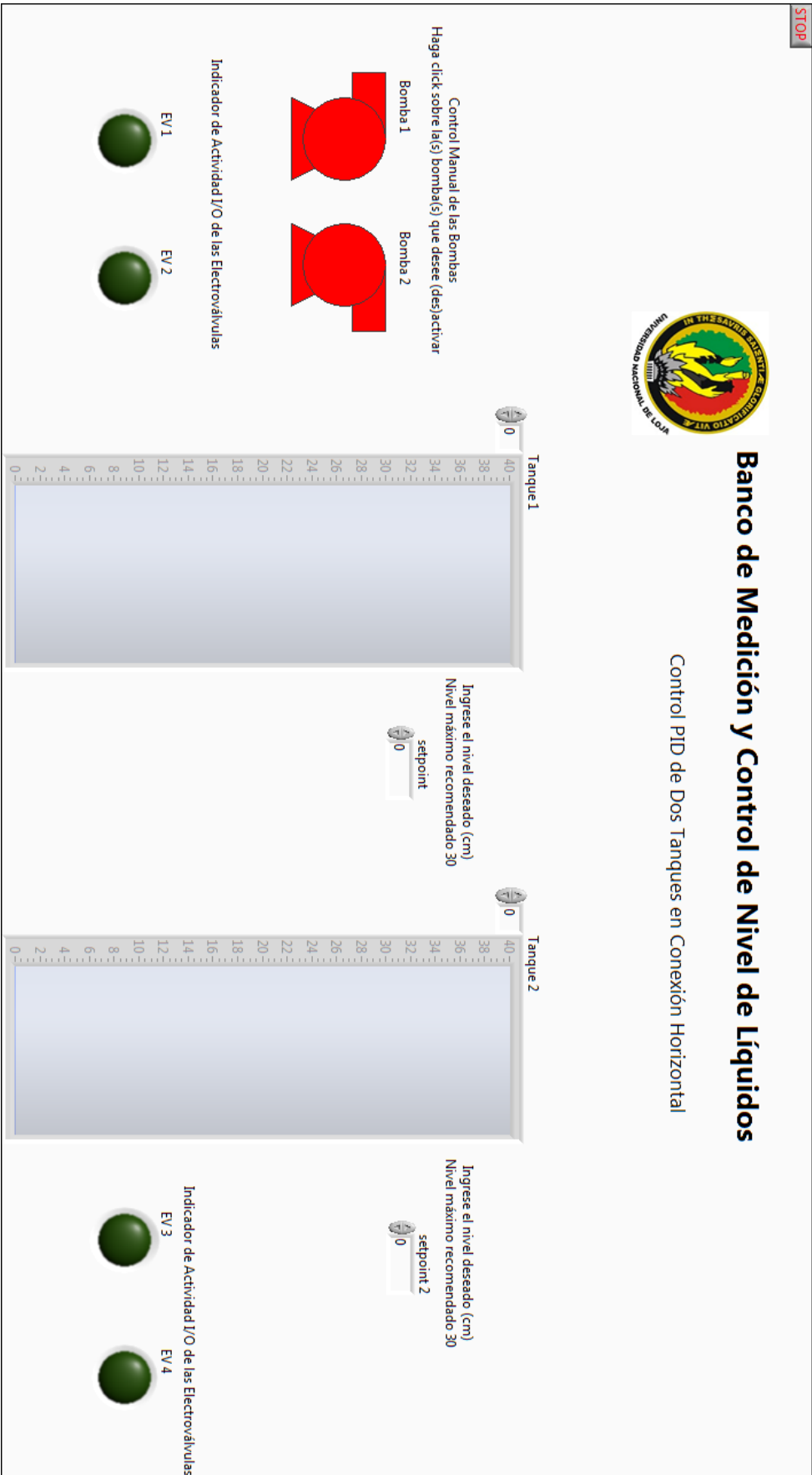


Figura 59. Panel frontal de Labview del Control PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor).

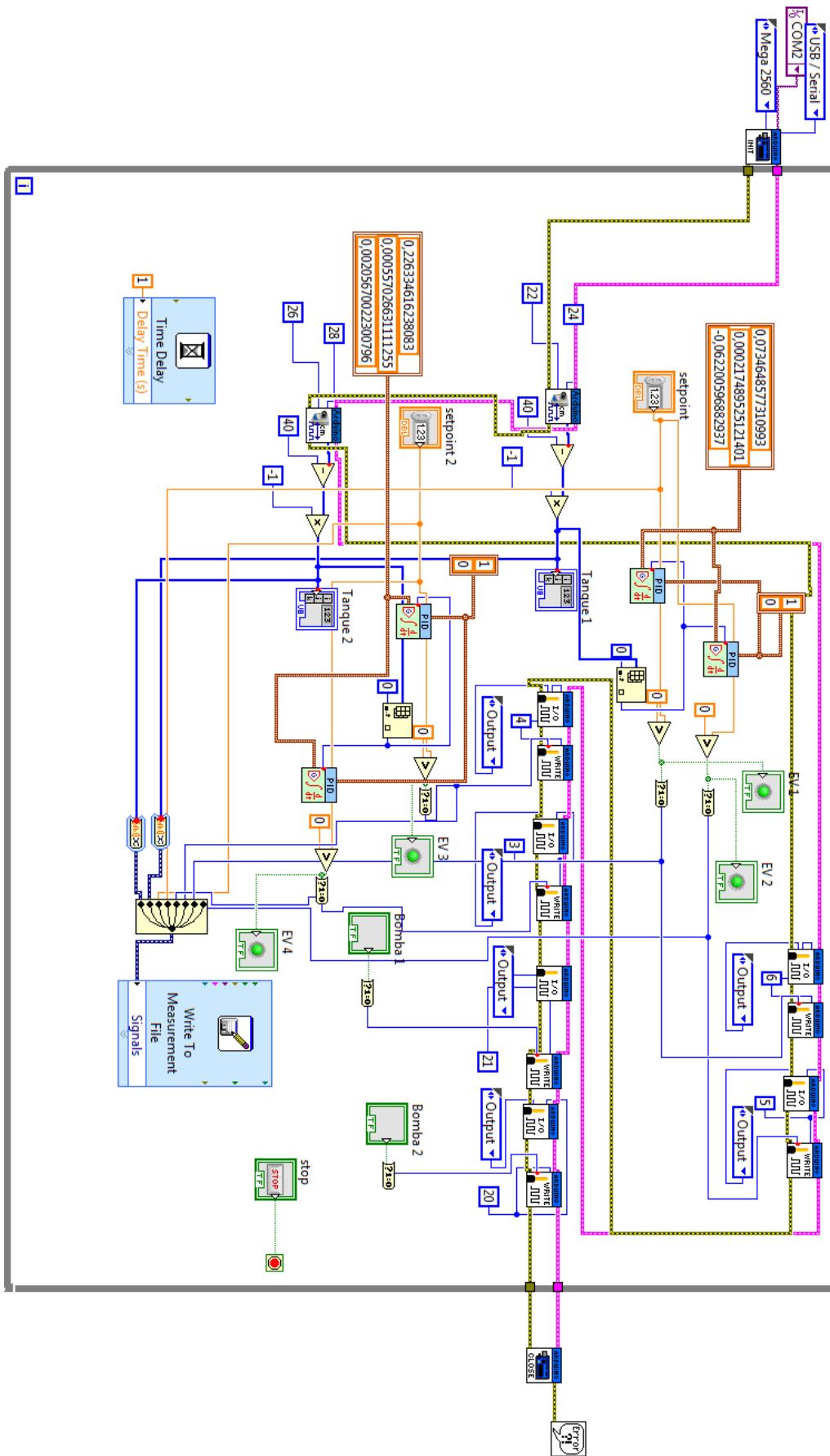


Figura 60. Diagrama de Bloques de Labview del control PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor).

STOP



## Banco de Medición y Control de Nivel de Líquidos

Control PID de Dos Tanques en Conexión Vertical

Control Manual de las Bombas  
Haga click sobre la(s) bomba(s) que desee (des)activar

Bomba 1

Bomba 2

Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas  
EV 1

EV 2

Tanque 162

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 15  
setpoint 0,00

Tanque 364

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 20  
setpoint 2 0,00

Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas  
EV 3

EV 4

Figura 61. Panel frontal de Labview del Control PID de dos tanques en conexión vertical (Autor)

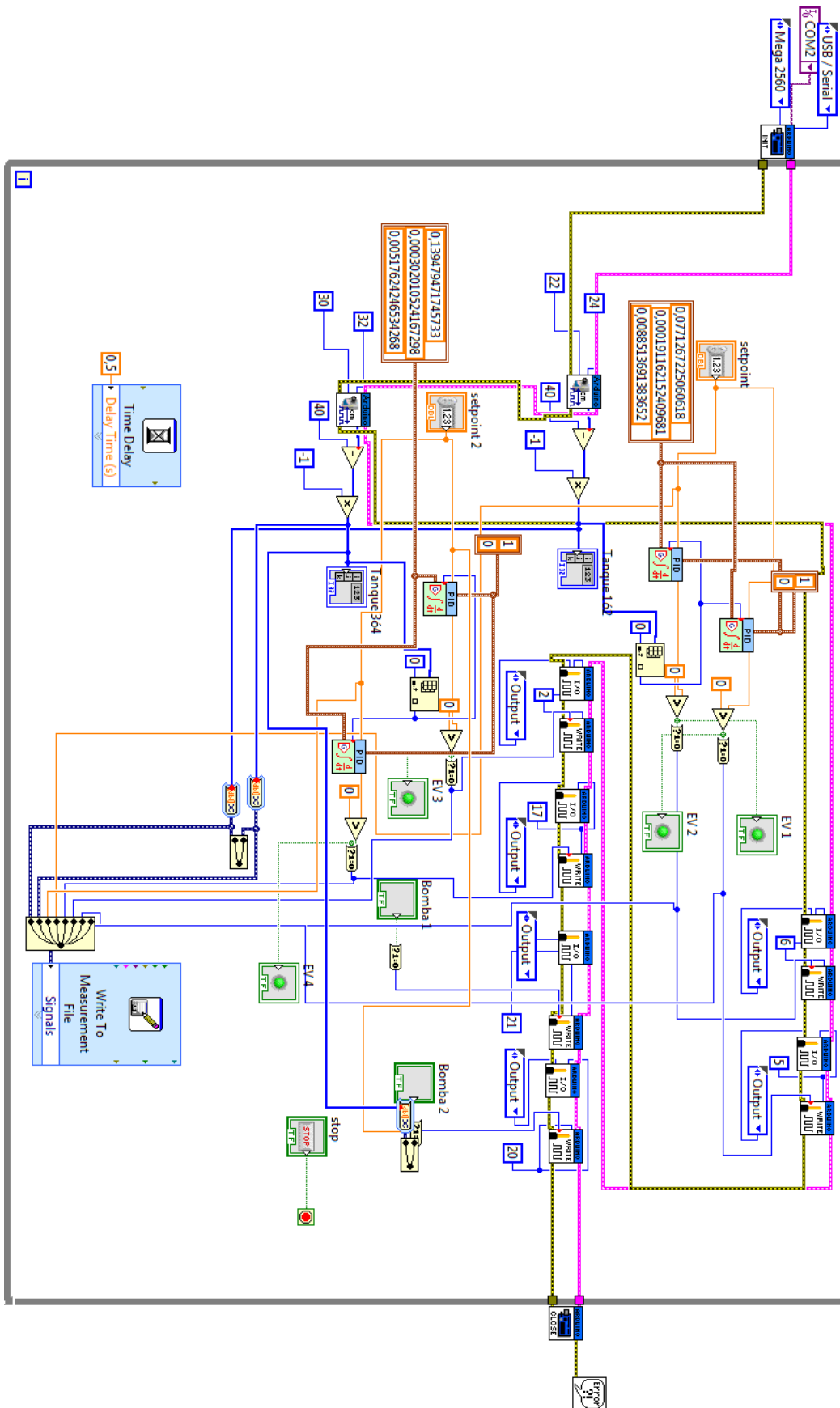


Figura 62. Diagrama de Bloques de Labview del control PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

STOP



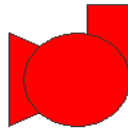
## Banco de Medición y Control de Nivel de Líquidos

Control PID de Todos los Tanques

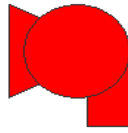
Control Manual de las Bombas

Haga click sobre la(s) bomba(s) que desee (des)activar

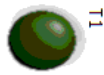
Bomba 1



Bomba 2



Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas



T1



Tanque 1

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 15

setpoint  
0,00



Tanque 2

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 15

setpoint  
0,00

Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas



T3



Tanque 3

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 20

setpoint  
0,00



Tanque 4

Ingrese el nivel deseado (cm)  
Nivel máximo recomendado 20

setpoint  
0,00

Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas



T2

Indicador de Actividad I/O de las Electroválvulas



T4

Figura 63. Panel frontal de Labview del Control PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

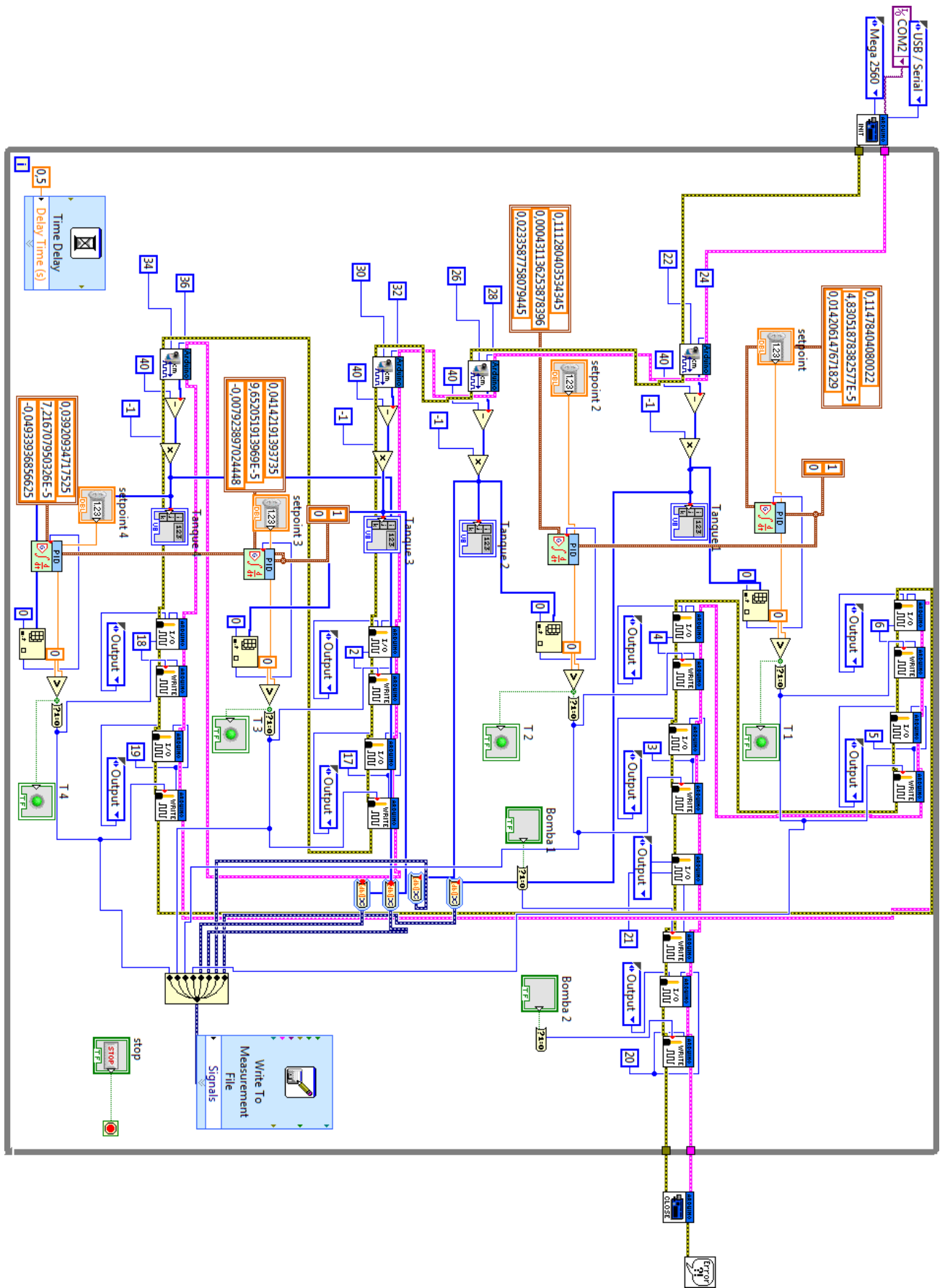


Figura 64. Diagrama de Bloques de Labview del control PID de dos tanques en conexión horizontal (Autor)

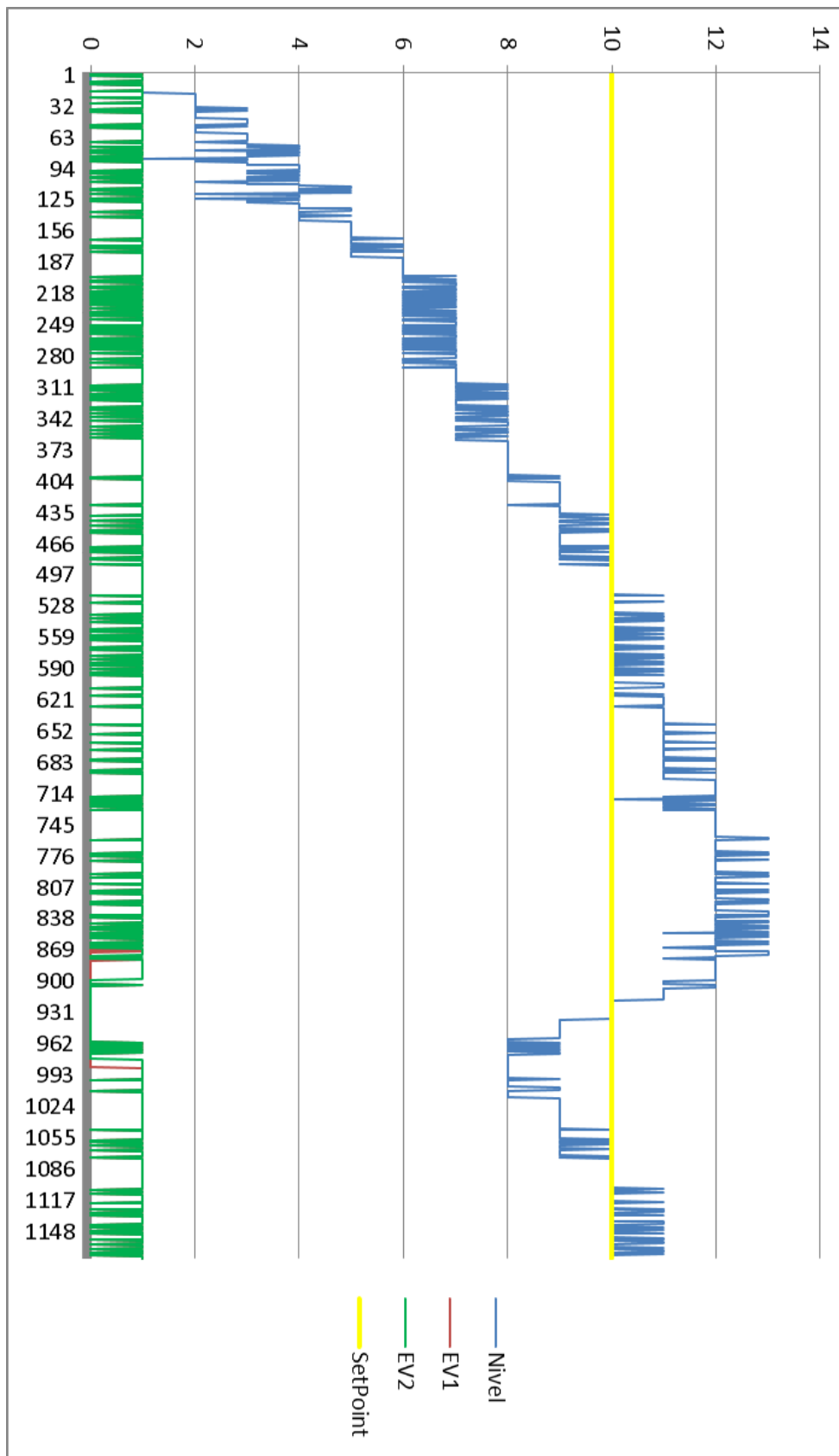


Figura 65. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en un solo tanque con la configuración automática dada en Simulink (Autor).



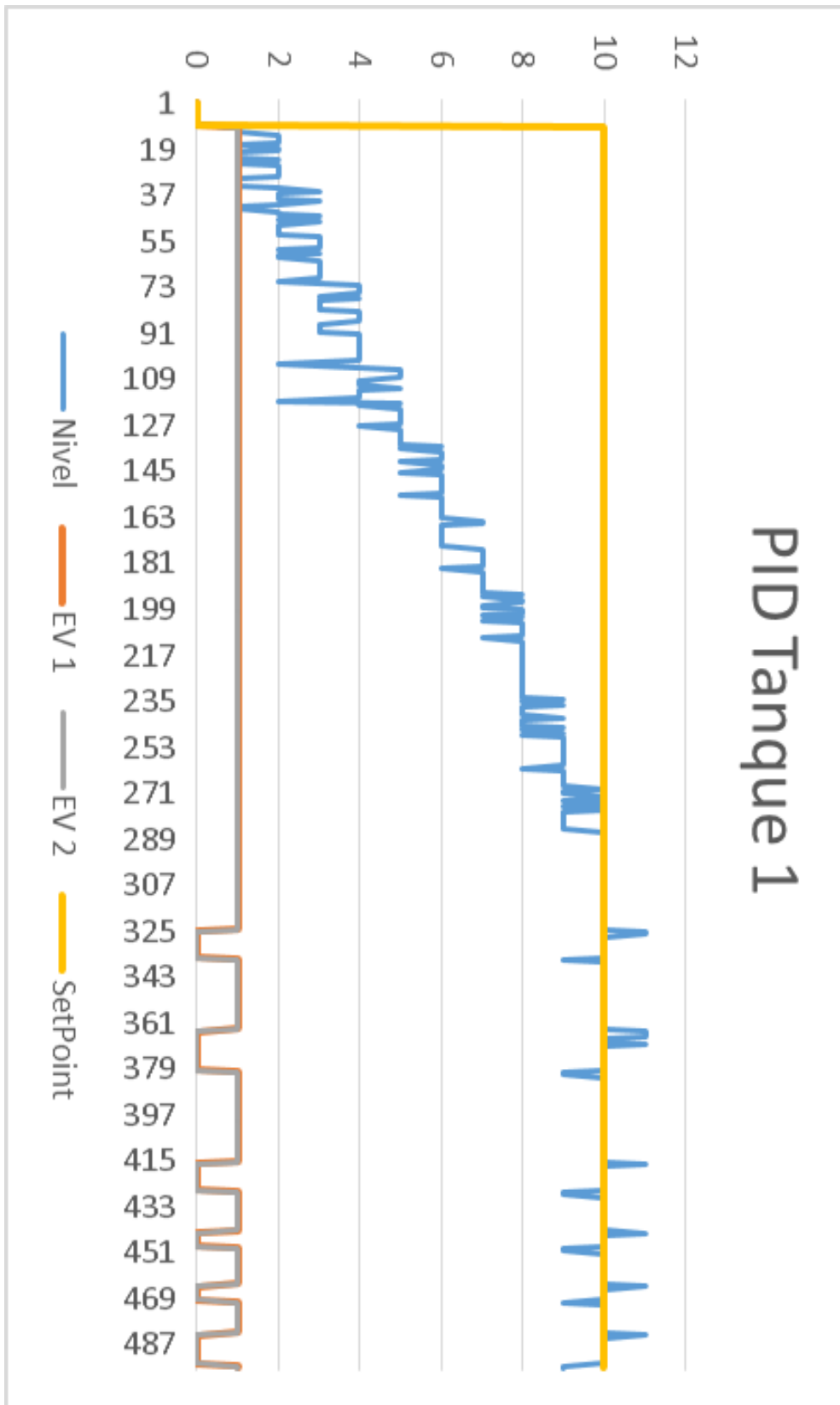


Figura 66. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en un solo tanque con la configuración modificada por el autor en Simulink (Autor).

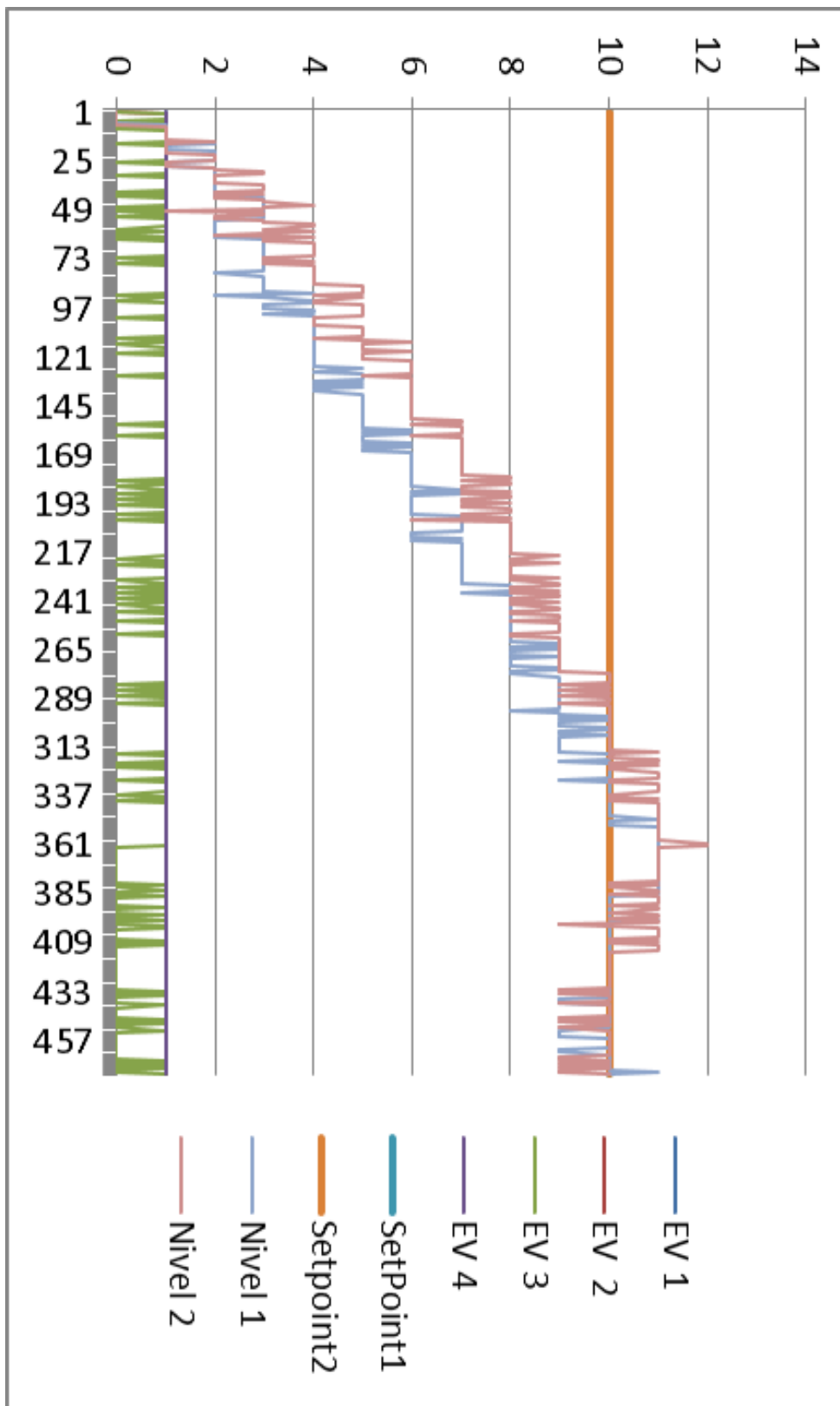


Figura 67. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en 2 tanques conectados horizontalmente con la configuración automática dada en Simulink (Autor).

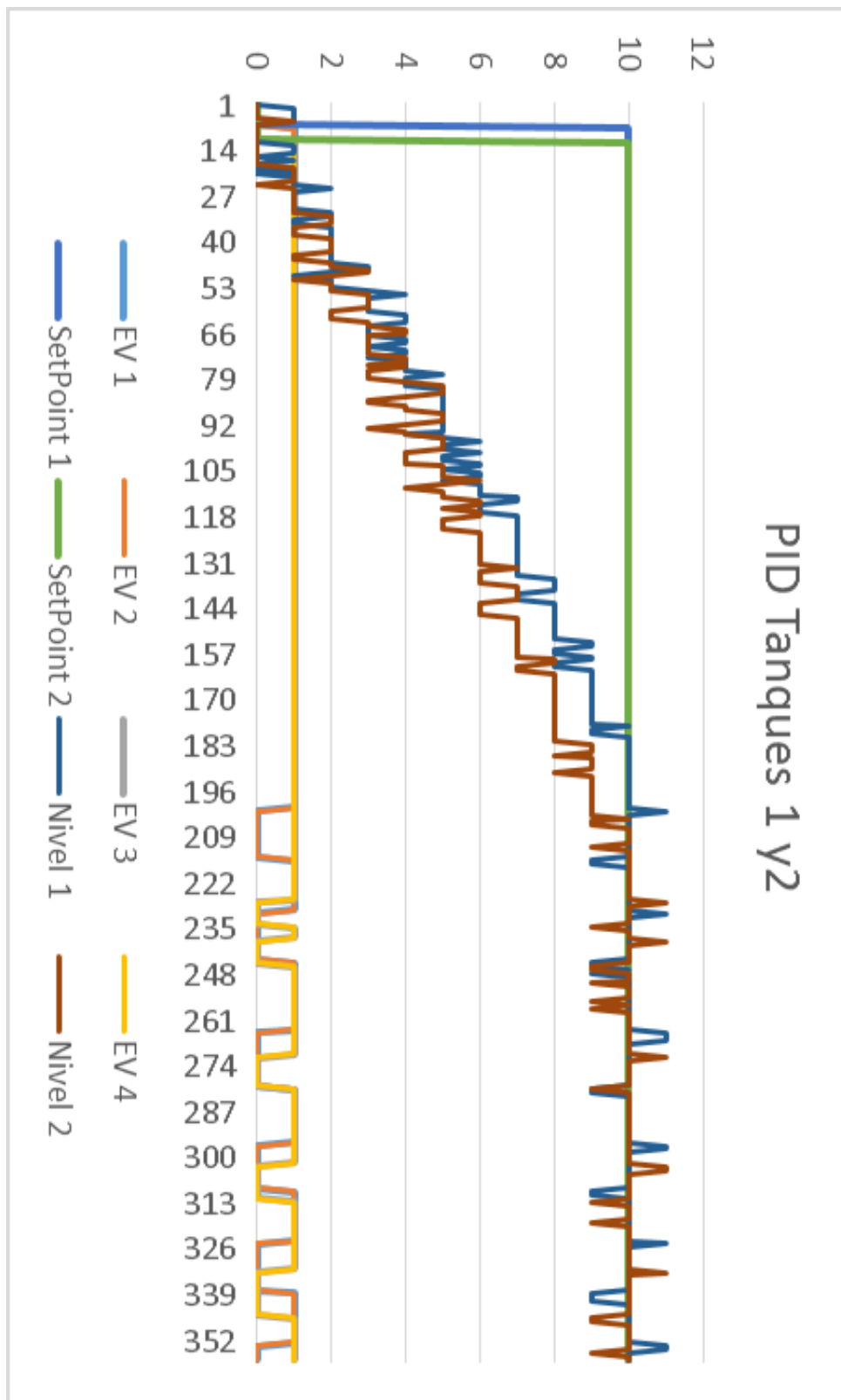


Figura 68. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en 2 tanques conectados horizontalmente con la configuración modificada por el autor en Simulink (Autor).

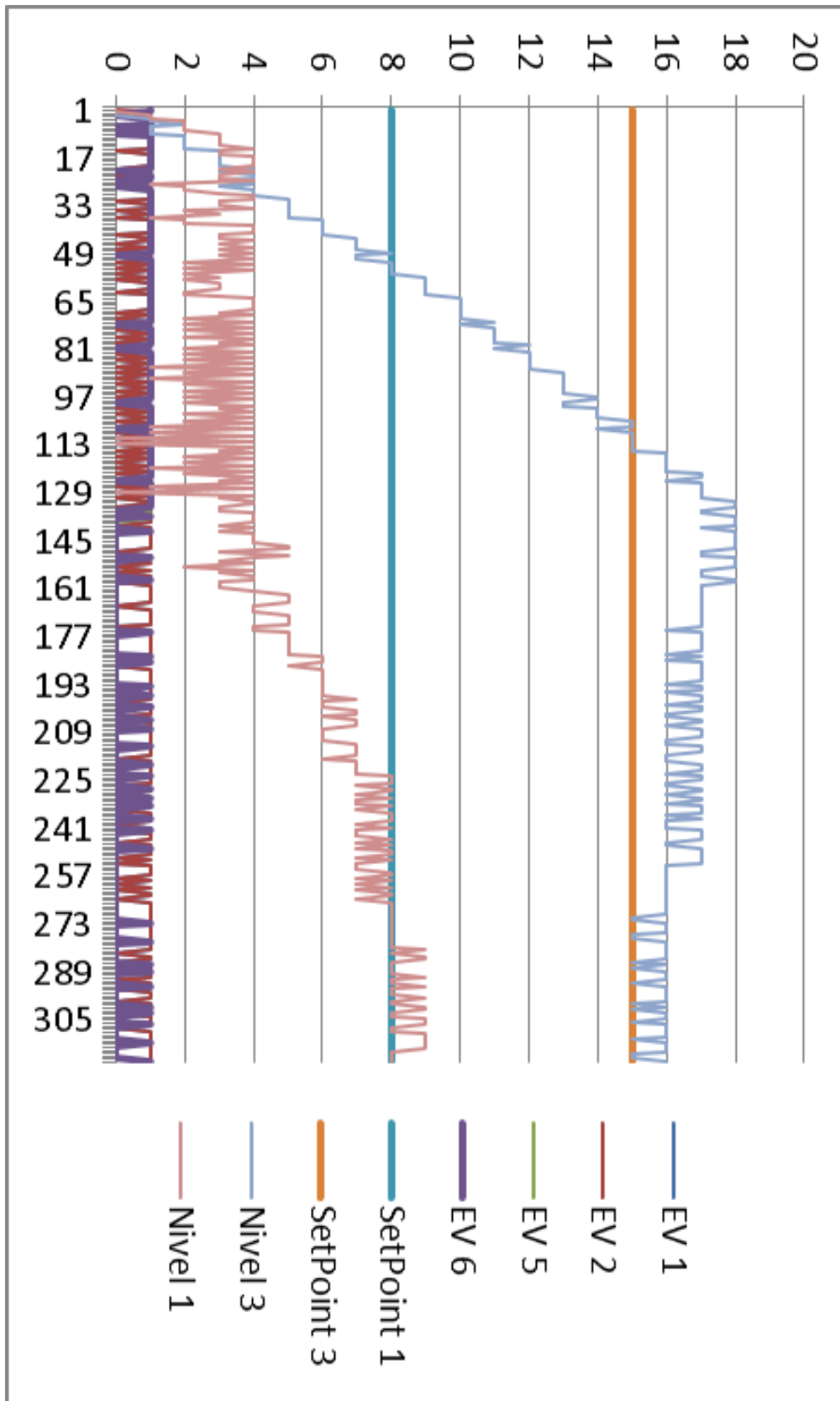


Figura 69. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en 2 tanques conectados verticalmente configuración automática dada en Simulink (Autor).

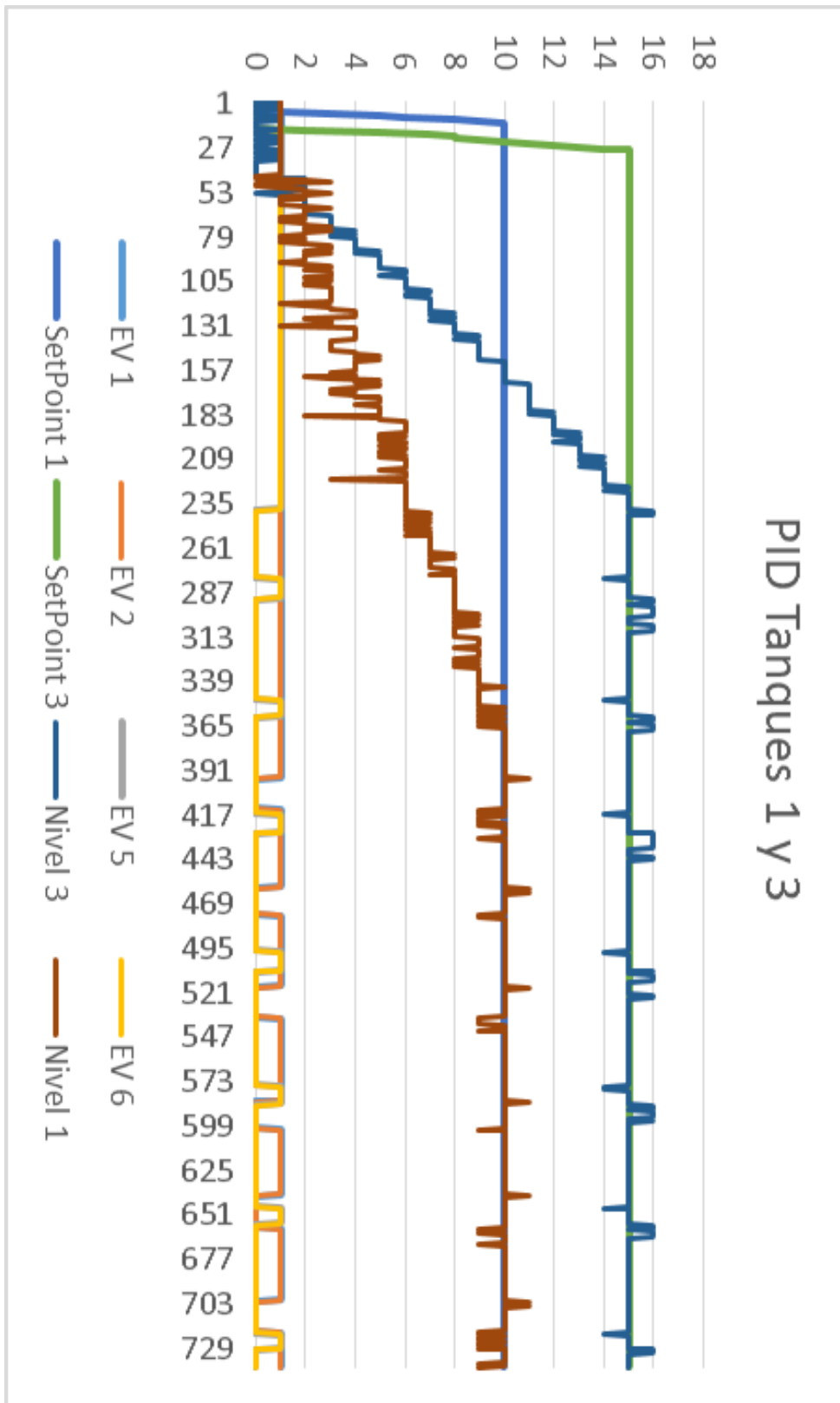


Figura 70. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en 2 tanques conectados verticalmente con la configuración modificada por el autor en Simulink (Autor).

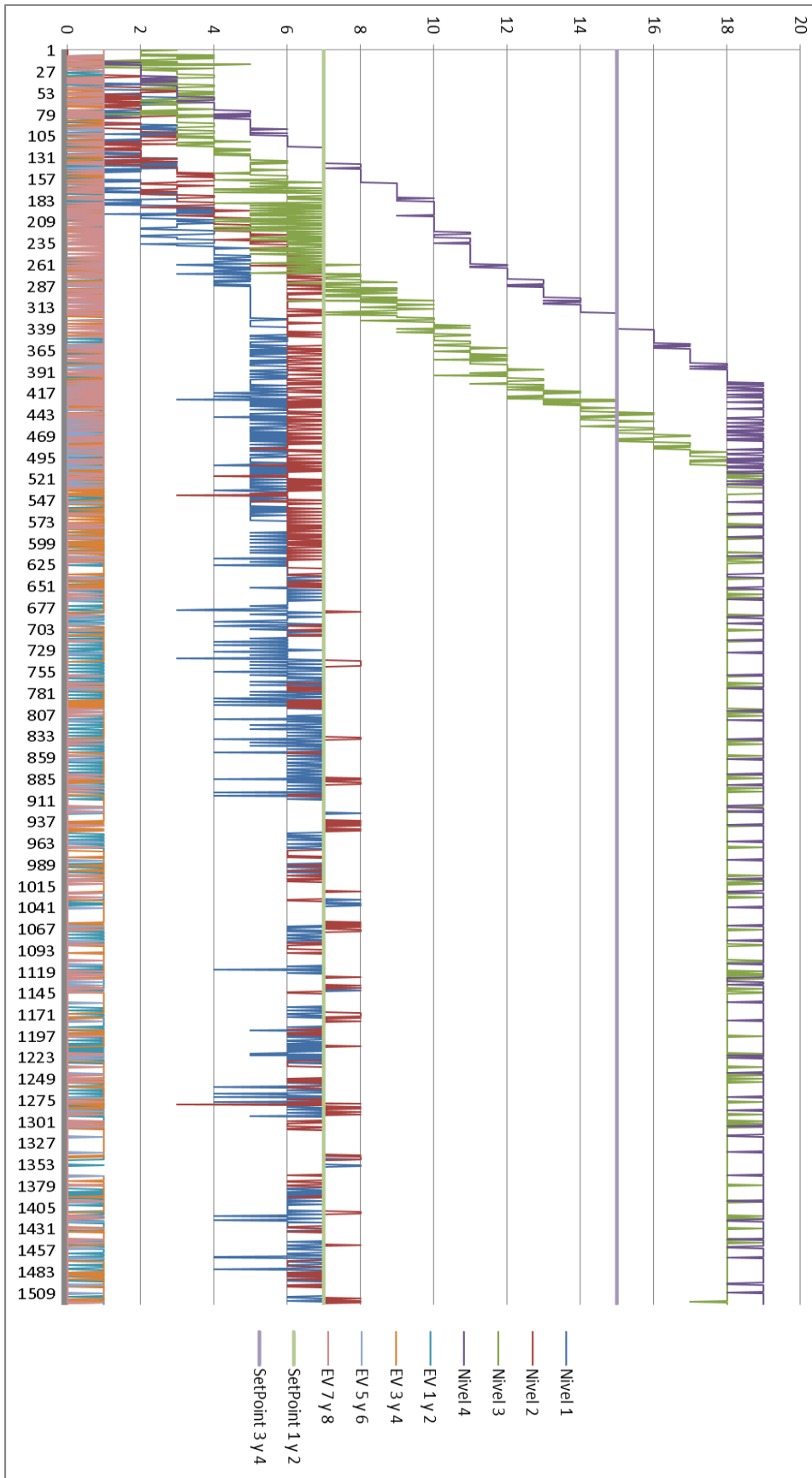


Figura 71. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en todos los tanques usando la configuración automática dada en Simulink (Autor).

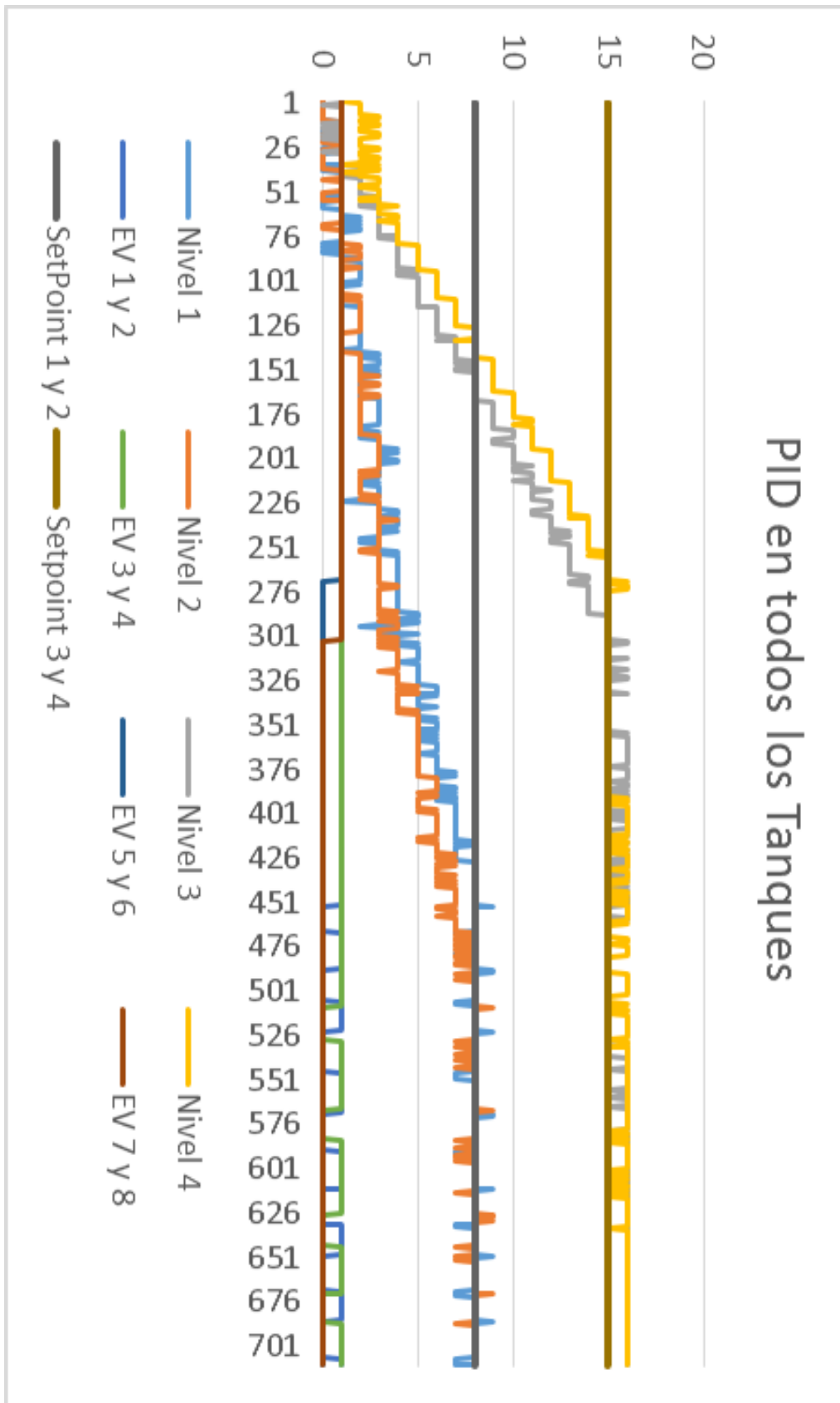


Figura 72. Gráfico de los datos reales obtenidos de la aplicación en Labview del control PID en todos los tanques usando la configuración modificada por el autor en Simulink (Autor).

## **g.- DISCUSIÓN**

La construcción del banco se llevó a cabo con normalidad teniendo dificultad tan solo para conseguir algunas reducciones a  $\frac{1}{4}$ " por escases de las mismas en el mercado local.

Para la implementación de los circuitos eléctricos y electrónicos no se tuvo ningún problema ni contratiempo y su acoplamiento al banco se realizó de forma completamente normal.

En base a la bibliografía consultada y la tutoría del Director del Proyecto se consiguió programar en LabView de forma exitosa el programa inicial de control, medición y obtención de datos para el resto del proyecto.

Una vez comenzadas las primeras pruebas se tuvo algunos contratiempos primero por sobrepresiones que se daban en las entradas a las electroválvulas, solucionando las mismas con un bypass de retorno al reservorio, posteriormente como consecuencia de las presiones algunas válvulas dejaron de funcionar por lo que tuvieron que ser reemplazadas teniendo contratiempos debido a su escases en el mercado en ese momento.

Una vez solucionados todos los problemas se comenzó a las pruebas y obtención de datos para su posterior análisis.

Para el análisis se siguió el procedimiento antes descrito en metodología con lo que fue posible obtener los modelos de cada proceso experimental propuesto. Los modelos obtenidos especialmente los de los procesos más simples resultaron con una aproximación a la realidad bastante cercana estando entre el 93 al 96% de fiabilidad, los procesos más complejos dada la entrada de perturbaciones no medibles fueron menos fiables y estaban entre el 84 y el 90% pero que sigue siendo bastante favorable dado el hecho mencionado.

Una vez obtenidos los modelos se los simuló en Simulink para la obtención de los mejores parámetros de los bloques PID mediante la herramienta de tuning de este bloque, este procedimiento se encuentra descrito en la metodología. Como era de esperarse la simulación reveló que los procesos más sencillos fueron los que menor rango de error iban a sufrir en el proceso de control gracias al modelo más acertado.



Para la aplicación de los parámetros PID en la programación de LabView nuevamente tomando en cuenta la bibliografía consultada y la tutoría del Director del Proyecto se consiguió programar satisfactoriamente los VIs de Control Automático de Nivel, pudiendo apreciarse un funcionamiento bueno de los procesos más sencillos y sorprendentemente un funcionamiento con un error muy similar al simulado en los procesos más complejos pero que sigue siendo tolerable dadas las perturbaciones del sistema que se tiene en estos procesos así como las imprecisiones de los sensores. Cabe recalcar que el proceso de control fuese de mayor efectividad si las electroválvulas fuesen de control proporcional pero su elevado costo no le permitieron al autor utilizarlas, dicho esto el desempeño del sistema con las electroválvulas instaladas es satisfactorio.

En las figuras 65 a 72 se puede observar las gráficas de los controles PID aplicando los parámetros automáticos brindados por la herramienta de modificación del control PID de Simulink así como las gráficas de los parámetros modificados usando esta misma herramienta luego de que el autor observara la inestabilidad de los sistemas con los primeros parámetros.

Los controles PID que se logró obtener tienen características similares a lo simulado en Simulink y con una precisión prevista en los modelos obtenidos a partir de la herramienta de Identificación de Sistemas de Matlab, en la gráfica de todos los tanques funcionando al mismo tiempo se puede observar que el nivel se estabiliza sobre el Setpoint en los tanques 3 y 4 debido al agua que desciende de los tanques superiores, debido a que este es el sistema con más perturbaciones se puede decir que el resultado es aceptable, en el resto de gráficas se tiene resultados bastante satisfactorio. En todas las gráficas de resultados de medición de los controladores PID (Figuras 64 a 71) la variación excesiva en la medida del nivel es en realidad ruido en el sensor ocasionado por la perturbación electromagnética que causa la apertura y cierre de electroválvulas que está más reducido en las aplicaciones con los parámetros modificados por el autor.

## **h.- CONCLUSIONES**

1. Para la realización de este proyecto se analizó bibliografía e información sobre el estado del arte del Control Automático de Nivel, los temas analizados fueron: Control Automático: Software y Hardware, Dispositivos de Medición de Nivel, Software de análisis de datos, Métodos de Identificación de sistemas y Controladores PID.
2. Se construyó el banco de pruebas y se procedió a realizar experimentos de mediciones de nivel en cada tanque así como aplicar sistemas de control manual y automático al paso de líquido hacia el mismo.
3. Con la herramienta de identificación de sistemas de Matlab, que resulta ser un recurso muy importante para la comprensión y obtención de los modelos matemáticos, se obtuvo los modelos matemáticos de los distintos sistemas experimentales realizadas en el banco con una precisión satisfactoria que en los sistemas más complejos el valor mínimo alcanzado fue 85% y llegando a tener hasta un 97% lo que se reflejó luego en la aplicación de las funciones de transferencia de estos modelos en la obtención de los parámetros de control PID
4. Utilizando Simulink de Matlab se consiguió predecir de manera bastante acertada los resultados de cada uno de los sistemas utilizando correctamente los datos obtenidos a través de la herramienta de identificación de sistemas, se logró simular y obtener los parámetros más adecuados para el control automático PID de cada uno de los sistemas de control planteados en el banco.
5. A los parámetros para el control PID obtenidos se los implementó en los distintos programas de control automático desarrollados en LabView obteniendo un resultado final similar al simulado como se puede apreciar en las gráficas expuestas en este trabajo.

## **i.- RECOMENDACIONES**

1. Como se observa en la discusión es recomendable dependiendo del sistema en que se trabaje o en el que se quiera aplicar el control PID no aplicar los parámetros de forma automática hasta que se esté satisfecho por la respuesta del sistema.
2. Incentivar a los docentes y estudiantes a diseñar más experimentos además de los mostrados en este trabajo así como nuevas formas de obtener los modelos matemáticos de los procesos.
3. Dado que el banco tiene una tarjeta Arduino con más de la mitad de sus puertos digitales y todas sus entradas analógicas libres, promover proyectos de modificación y mejoramiento del banco construido.
4. Seguir las instrucciones del Anexo: Manual del Usuario del Banco de Medición y Control de Nivel para obtener buenos resultados en los experimentos que realicen y preservar la vida útil de los componentes del banco.
5. Incentivar el desarrollo de aplicaciones y proyectos estudiantes utilizando la plataforma Arduino y plataformas “opensource” que permiten realizar aplicaciones de gran funcionalidad a bajo costo.

## **j.- BIBLIOGRAFÍA**

**AGUADO Behar, Alberto. 2000.** *Temas de Identificación y Control Adaptable*. La Habana : Instituto de Cibernética, Matemática y Física, 2000. ISBN - 959 - 7056 - 11 - 9.

**ALVARADO, José y ROMERO, Edgar. 2009.** *Energías Renovables*. Bogotá : CEAC, 2009.

**Arduino.** Arduino website. *Arduino*. [En línea] <http://www.arduino.cc>.

**CALDERON Juan, SÁNCHEZ Yamilet. 2004.** Universidad Simón Bolívar. [En línea] 2004. [http://prof.usb.ve/srevolla/Archivos/Instru/Sept%202009/PS2321\\_GUIA\\_COMPLETA\\_%28rev\\_4\\_2%29%28Cap\\_1-6%29.pdf](http://prof.usb.ve/srevolla/Archivos/Instru/Sept%202009/PS2321_GUIA_COMPLETA_%28rev_4_2%29%28Cap_1-6%29.pdf).

**CARRIÓN, Carlos. 2008.** *Máquinas eléctricas*. México : Mc Graw-Hill, 2008.

**Fraden, Jacob. 2004.** *HANDBOOK OF MODERN SENSORS Physics, Desings and Applications*. New York, USA : Springer-Verlag New York, Inc., 2004. ISBN 0-387-00750-4.

Fundamentos del control automático industrial. [En línea] [http://www.sapiensman.com/control\\_automatico/index.htm](http://www.sapiensman.com/control_automatico/index.htm).

**HOLGUÍN LONDOÑO, GERMÁN ANDRÉS. 2002.** [En línea] 2002. [Citado el: 09 de 06 de 2013.] <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Labview/ParaAprender/Curso%20LabVIEW6i.pdf>.

**Mendiburu Díaz, Henry Antonio. 2006.** *INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL INDUSTRIAL*. Lima : INDECOPI, 2006. Partida Registral N° 00768-2006.

**National Instruments.** [En línea] <http://www.ni.com>.

**RAMÍREZ, Patricio. 2012.** *Transferencia de Calor*. Loja : UNL, 2012.

**Ríos, Sixto. 1995.** *Modelización*. 1995. ISBN 978-84-206-2822-6.

**Sapiensman.** Sapiensman. [En línea] [http://www.sapiensman.com/control\\_automatico/control\\_automatico.htm](http://www.sapiensman.com/control_automatico/control_automatico.htm).

**VISIOLI, Antonio. 2006.** *Practical PID Control*. Brescia : Springer, 2006. ISBN-13: 9781846285851, ISBN-10: 1846285852.

## **k. ANEXOS**