

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE UNA PLANTA  
DE NIVEL DE LIQUIDO, SISTEMA VASOS COMUNICANTES”**

**TESINA DE SEMINARIO**

**Previa a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN EN  
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**Presentada Por:**

**VÍCTOR NAPOLEÓN LÓPEZ MEDINA**

**DAMIÁN PERFECTO ALVARADO CAMATÓN**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A medida del transcurso de la realización del proyecto han ocurrido ciertas circunstancias como el haber tenido una experiencia satisfactoria a lo largo de mi vida estudiantil y haber confinado todos los conocimientos adquiridos en el transcurso de mi carrera.

También tuve la oportunidad de enrolarme con personas de mucho apoyo como así mismos gente que no me dio la mano. Por ello, gracias a todos los que hicieron posible terminar esta etapa de mi vida, principalmente a mi Familia que estuvo apoyándome en todo momento.

Agradezco infinitamente a mi tutor Máster Holger Cevallos, por su compromiso y apoyo, para que este proyecto llegue a su término.

Un agradecimiento a mi mamita Albita y mi tío Rogelio Córdova por su apoyo incondicional, ya que estuvo apoyándome en cada momento de mi

realización de tesis. También agradezco a mi padre ya que es el pilar fundamental en mi vida, y el que me inspira para seguir adelante.

*Víctor Napoleón López Medina.*

Agradezco a Dios, a mi padre Samuel Alvarado, a mis hermanos, a mis hermanos de la Iglesia, al Ing. Holger Cevallos, a mi compañero de Tesis Víctor López y a todos mis amigos.

*Damián Perfecto Alvarado Camatón.*

## **DEDICATORIA**

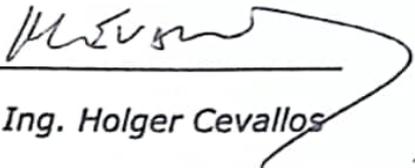
El siguiente trabajo le quiero dedicar principalmente a mi papá porque sin él no hubiera culminado mis estudios y también por haberme traído al mundo él es la persona que me inspira y por la que lucho día a día, a mi mamá Alba López porque siempre estuvo conmigo y por creer en mí, también le quiero dedicar este trabajo a Ruth López porque sin su apoyo no hubiera culminado mi proyecto.

*Víctor Napoleón López Medina.*

Este proyecto lo dedico a mi padre, a mis hermanos y a mis amigos.

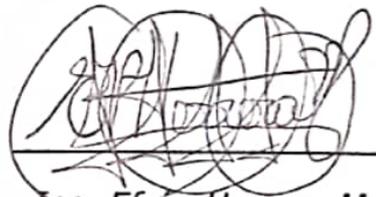
*Damián Perfecto Alvarado Camatón.*

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**



*Ing. Holger Cevallos*

**PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADO**



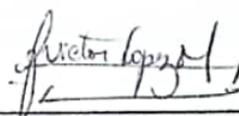
*Ing. Efrén Herrera M*

**PROFESOR DELEGADO DEL DECANO FIEC**

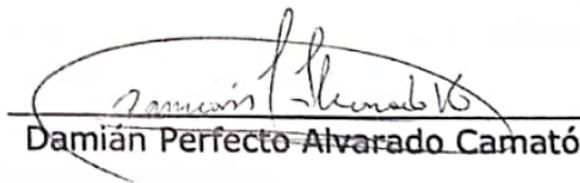
## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesina de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)



Víctor Napoleón López Medina



Damián Perfecto Alvarado Camató

## **RESUMEN**

El diseño y construcción de este sistema está basada en la aplicación específica de control, como en este caso la de control de nivel de un tanque. Para realizar este tipo de control se lee una variable física que luego es manipulada por un controlador en el que se ajustan sus parámetros para el funcionamiento óptimo del actuador a fin de obtener una respuesta apropiada del sistema.

El controlador se lo diseña en un computador que contiene instalado el software Labview, el cual gracias a su desempeño es ampliamente usado en la Instrumentación Virtual. El programa 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, es de mucha utilidad debido a que cuenta con herramientas para como identificación de sistemas, diseño de control, simulación, etc. En el desarrollo del presente trabajo usaremos el indicado software de la Nacional Instruments, el mismo que está diseñado para el desarrollo, supervisión, control y adquisición de datos de procesos industriales.

En el **capítulo 1** detallamos todo el contenido teórico de cada uno de los componentes de un sistema de control de nivel, por eso que en este capítulo se hace un análisis de la medición de nivel, controladores PID, y del elemento regulador de nivel.

En el **capítulo 2** se diseña la planta de control de nivel, y se detalla los elementos que forman parte de dicha planta con sus respectivas características de funcionamiento, desde el software hasta el recipiente que contiene el líquido que para nuestro caso serán de vidrio y de forma rectangular.

En el **capítulo 3** se procede a realizar la obtención teórica de las funciones de transferencia de los componentes que forman parte de la planta.

En el **capítulo 4** se describe el procedimiento para la identificación de sistemas con la herramienta de identificación de sistemas de Labview, específicamente para una planta de control de nivel, que es el tema a desarrollar en este trabajo.

En el **capítulo 5** se realiza el diseño del control de la planta para lo cual se procede a su simulación, la selección apropiada del controlador y su

sintonización. Se describe la operación de la planta y el análisis del funcionamiento de la misma con su respectivo análisis de resultados. Finalmente se incluirán las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

DECLARACIÓN EXPRESA

RESUMEN

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

## **CAPÍTULO 1**

**1.CONCEPTOSTEÓRICOS.....1**

1.1 Medición de Nivel.....1

1.1.1 Medición de nivel de líquidos.....2

1.1.1.1 Métodos de la mirilla de nivel .....2

1.1.1.2 Método de Barra calibrada.....3

1.1.1.3 Switch de flotador.....4

1.1.1.4 Método de flotador/cuerda.....	5
1.1.1.5 Medidores Manométricos y de Presión diferencial.....	6
1.2 Sistemas interactivos y no Interactivos.....	8
1.3 Tipos de controladores.....	11
1.3.1 Acción de control proporcional.....	11
1.3.2 Acción de control integral.....	13
1.3.3 Acción de control Derivativa.....	15
1.3.4 Acción de control proporcional-integral.....	18
1.3.5 Acción de control proporcional-derivativa.....	19
1.3.6 Acción de control Proporcional-Integral-Derivativa.....	20
1.3.7Funcionamiento de un Controlador PID.....	23
1.3.7.1 Significado de las constantes.....	24
1.3.8 Método relé (Aström-Hägglund).....	25
1.4 linealización de funciones.....	26
1.4.1 Variables de desviación.....	28
1.4.2 Linealización de funciones de una variable.....	30
1.5 Actuadores.....	33
1.6 Control con PWM.....	34
1.6.1 Funcionamiento del PWM.....	35

## **CAPÍTULO 2**

<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....</b>	<b>38</b>
2.1 Montaje de la planta.....	38
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA.....	42
2.2.1 Tanques.....	42
2.2.2 Válvula Solenoide.....	44
2.2.3 Transmisor de Presión.....	45
2.2.4 Sensor de proximidad GP2Y0A21YK0F.....	46
2.2.5 Bombas DC.....	49
2.2.6 Computador.....	49
2.2.7 DISEÑO ELECTRÓNICO.....	50
2.2.7.1 Diseño del circuito de aislamiento de control: Salida PWM y Fuerza: Troceador Clase A.....	50
2.2.7.2 Diseño del circuito de Alimentación con Salida a 12 VDC.....	52
2.2.7.3 Diseño del circuito de Acondicionamiento para la Señal del Sensor de Proximidad.....	53
2.2.7.4 Diseño del circuito de Acondicionamiento para la Señal del Sensor de Presión.....	54

2.2.7.5 Diseño del circuito de Acondicionamiento para la Señal que activa la Válvula Solenoide.....	55
2.2.8 SOFTWARE LABVIEW.....	56

### **CAPÍTULO 3**

<b>3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIAS.....</b>	<b>59</b>
3.1 Tanque – Válvulas.....	59
3.2 Sensor.....	62
3.3 Bomba.....	63
3.3.1 Modelo circuital de un motor de c.c.....	64
3.4 Función de Transferencia general de la planta.....	66

### **CAPÍTULO 4**

<b>4. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.....</b>	<b>68</b>
4.1 Introducción a la Identificación de sistemas.....	68
4.2 Adquisición de Datos.....	70
4.2.1 Señal estímulo aplicada al sistema.....	73
4.2.2 Señal de respuesta del sistema.....	73
4.3 Pre Procesado de Datos.....	74

4.3.1 Escalamiento de datos.....	75
4.4 Selección y Validación del Modelo.....	76
4.4.1 Selección del modelo.....	78
4.4.2 Simulación del modelo.....	79
4.5 Modelo seleccionado para la planta.....	79

## **CAPÍTULO 5**

<b>5. CONTROL, SINTONIZACIÓN Y SIMULACIÓN.....</b>	<b>81</b>
5.1 Control PID utilizado desde Labview.....	81
5.2 Sintonización de Parámetros del Controlador.....	81
5.3 Criterios de Selección del Controlador.....	84
5.4 Implementación del Controlador.....	84
5.5 Diseño del Generador PWM.....	85
5.6 Simulación de la Planta con Controlador.....	86
5.7 Scada de la planta.....	87
5.8 Manejo de la Planta.....	87
5.9 Características Dinámicas y Estáticas del Transmisor de Presión.....	89
5.9.1 Características Estáticas.....	90

5.9.2 Características Dinámicas.....	96
--------------------------------------	----

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **ANEXOS**

Anexo A: Esquemáticos y Circuitos Impresos de los Circuitos de control, acondicionamiento y fuerza

Anexo B: Medición de las señales Diente de sierra y PWM, del circuito de control

Anexo C: Linealización de la señal de voltaje del Sensor de Proximidad

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ABREVIATURAS**

VDC Voltaje de corriente directa

VAC Voltaje de corriente alterna

DC Corriente Directa

AC Corriente Alterna

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
Figura 1.1 Estanque Abierto.....	2
Figura 1.2 Estanque Cerrado.....	2
Figura 1.3 Barra Calibrada.....	3
Figura 1.4 Flotador Normal.....	4
Figura 1.5 Flotador con Imán.....	4
Figura 1.6 Flotador Cuerda.....	5
Figura 1.7 Medidor Manométrico y de Presión diferencial.....	7
Figura 1.8 Sistema no interactivo Proceso con dos tanques en cascada.....	9
Figura 1.9 Sistema Interactivo Proceso con dos Tanques en Paralelo.....	10
Figura 1.10 Gráficos de la variable del proceso con ganancia P.....	12
Figura 1.11 Gráficos de la variable del proceso con ganancia PI.....	14
Figura 1.12 Gráficos de la variable del proceso con ganancia D.....	17
Figura 1.13 Gráficos de la variable del proceso con ganancia PID.....	22
Figura 1.14 Grafica oscilaciones técnica relé.....	26
Figura 1.15Gráfico de las variables de desviación, variable absoluta y el Punto de operación.....	28
Figura 1.16 Aproximación lineal.....	32
Figura 1.17 Señal PWM que se le ha cambiado el ciclo de trabajo.....	35
Figura 1.18 Control de velocidad con PWM.....	36

Figura 2.1 Planta de Nivel configuración Vasos Comunicantes.....	39
Figura 2.2 Esquema de la planta de control de nivel.....	41
Figura 2.3 Diagrama de bloques general de control de nivel de la planta.....	42
Figura 2.4 Tanque de reserva.....	43
Figura 2.5 Tanque Principal.....	43
Figura 2.6 Válvula Solenoide.....	44
Figura 2.7 Transmisor de Presión.....	45
Figura 2.8 Sensor de Proximidad.....	46
Figura 2.9 Diagrama de bloques del sensor de presión.....	47
Figura 2.10 Características del sensor de Proximidad.....	48
Figura 2.11 Bomba con Motor de Corriente Continua.....	49
Figura 2.12 Circuito de Control y Fuerza para las bombas DC.....	50
Figura 2.13 Fuente de alimentación con Salida a 12 VDC.....	52
Figura 2.14 Circuito de Acondicionamiento para la señal del Sensor de Proximidad.....	53
Figura 2.15 Circuito de Acondicionamiento para la señal del Transmisor de Presión.....	54
Figura 2.16 Circuito de Acondicionamiento para la señal de activación de la Válvula solenoide.....	55
Figura 3.1 Válvula Solenoide y Manual.....	59
Figura 3.2 Sistema Tanque-Válvula.....	59

Figura 3.3Circuito equivalente de un motor de Corriente Continua.....	63
Figura 3.4Diagrama General de la planta.....	65
Figura 4.1 Esquema de configuración para identificación de la planta.....	70
Figura 4.2Adquisición de la señal que entrega el transmisor de Presión.....	70
Figura 4.3 Grafica Altura vs Voltaje del Transmisor sin linealizar.....	71
Figura 4.4 Grafica Altura vs Voltaje del Transmisor linealizada.....	73
Figura 4.5Señal estímulo aplicada al Sistema.....	73
Figura 4.6 Señal de respuesta del Sistema.....	73
Figura 4.7Adquisición de la señal de medida.....	74
Figura 4.8SubVi convertidor de Voltaje a Altura.....	75
Figura 4.9 Vi que genera la función de transferencia de la planta.....	76
Figura 4.10 Vi usado en la Identificación de la planta.....	78
Figura 4.11Resultados obtenidos en la identificación de la planta.....	79
Figura 4.12 Función de Transferencia de la planta con Labview.....	80
Figura 4.13 Señales obtenidas en la Identificación del sistema.....	80
Figura 5.1Vi utilizado para Sintonizar la Planta.....	82
Figura 5.2 Señales obtenidas en la Sintonización de la planta.....	83
Figura 5.3 Circuito en lazo cerrado del control de nivel de la planta.....	84
Figura 5.4 Circuito de control PWM.....	85
Figura 5.5 Señales Simuladas obtenidas del circuito de control PWM.....	86
Figura 5.6Señales obtenidas del controlador y respuesta del sistema. ....	86

Figura 5.7 Scada de la planta de nivel.....87

Figura 5.8 Señales de respuesta del sistema, con ganancias  
ajustadas.....88

Figura 5.9 Característica del Transmisor de Presión.....97

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla 1 <i>Ajuste de los parámetros PID</i> .....	25
Tabla 2 Ganancias obtenidas para cada tipo de controlador.....	83

## **CAPITULO I**

### **1. CONCEPTOS TEÓRICOS**

#### **1.1 MEDICIÓN DE NIVEL**

La medida de nivel es justa con la presión, volumen, velocidad y caudal de gran importancia en hidrografía, hidráulica y en los procesos industriales. Aplicaciones frecuentes son las medidas de los niveles de los estanques y recipientes de todo tipo, en canales, pozos, esclusas, vertederos, etc. Esta medida sirve para determinar el contenido de los tanques para accionar dispositivos de alarma y seguridad en los recipientes a presión, para el accionamiento de válvulas, etc.

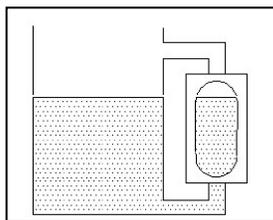
Un factor importante es la forma del recipiente en el cual se debe medir el nivel del líquido. El grado de exactitud depende de la forma del recipiente, ya que en un recipiente alto y de pequeño diámetro puede medirse más exactamente que otro aplanado y de diámetro grande.

## 1.1.1 MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

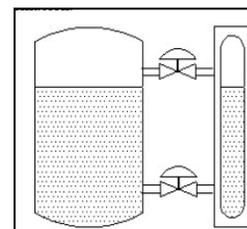
### 1.1.1.1 Métodos de la mirilla de nivel

Consiste en tomar una medición de nivel con la ayuda de un visor que se instala junto al tanque del cual se quiere tomar la medición (Figura 1.1), si la mirilla de nivel se monta en una tubería de derivación con llaves de paso en cada extremo (Figura 1.2), se logra aislarla del estanque principal, lo cual permite su retiro para mantenimiento.

Una de las ventajas es que es sencillo y relativamente barato pero la desventaja es que es poco usual para procesos industriales y no permite retransmisión de la información.



**Figura 1.1** Estanque Abierto.

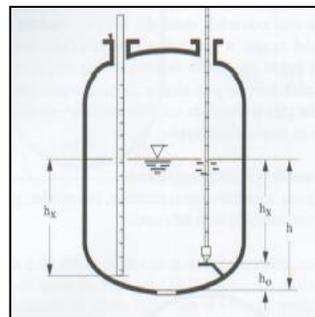


**Figura 1.2** Estanque Cerrado.

### 1.1.1.2 Método de Barra calibrada

Este es un método manual que se aplica a líquidos y sólidos granulados. En silos muy altos se emplean muelles de acero con un contrapeso en su extremo. La aplicación más familiar de una barra calibrada es la varilla empleada para comprobar el nivel del aceite de un motor de automóvil.

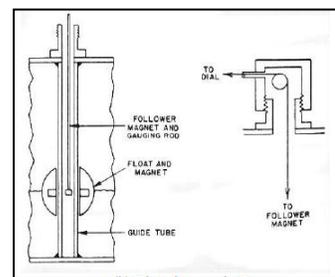
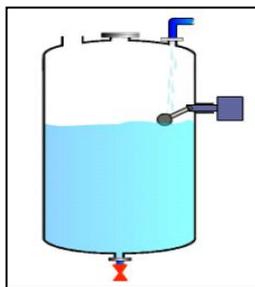
Una de la ventajas es que es sencillo y de bajo costo pero es poco apropiado para procesos industriales no dispone de salida electrónica, no requiere empleo de escalares, y no es apropiado para recipiente de alta presión.



**Figura 1.3** Barra Calibrada.

### 1.1.1.3 Switch de flotador

Es el switch de nivel más conocido y simple, consta de un cuerpo flotante montado sobre un brazo móvil y acoplado magnéticamente a un micro interruptor como se muestra en la figura 1.4. También hay versiones que consisten en un flotador redondo con un pequeño imán que sube a lo largo del tubo. En el tubo hay uno o varios relés de láminas, los relés de láminas harán conmutar al relé a medida que el flotador (imán) pase. Una ventaja es que es relativamente sencillo y adecuado para muchos productos y de bajo costo pero sus desventajas serían que requiere de un cierto montaje y punto de de conmutación no reproducible además de mal funcionamiento en caso de adherencias y no es a prueba de fallos.

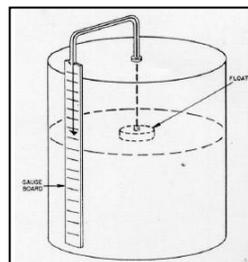


**Figura 1.4** Flotador Normal. **Figura 1.5** Flotador con Imán.

#### 1.1.1.4 Método de flotador/cuerda

Al igual que el caso anterior consiste en un flotador pero que en este caso se utiliza para la medición continua de nivel. La forma más simple de un sistema de este tipo consiste en un flotador, un cable fino, dos agarres y un peso suspendido en la parte exterior del tanque abierto. En la parte exterior se coloca una escala graduada y la posición del peso a lo largo de la escala indica el nivel del contenido del tanque.

Una de las ventajas es que es relativamente sencillo, adecuado para diversos productos y muy precisos, pero así mismo requieren de cierta cantidad de equipo mecánico y no suelen ser adecuados para aplicaciones en proceso.



**Figura 1.6** Flotador Cuerda.

### 1.1.1.5 Medidores Manométricos y de Presión diferencial

Este método se basa en la medición de la presión hidrostática correspondiente a una columna de líquido de una altura determinada. La presión se calcula mediante la fórmula:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Donde:

$P$  = Presion

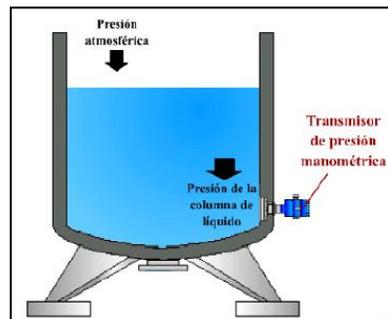
$\rho$  = Densidad relativa

$g$  = Aceleración de Gravedad

$h$  = Altura de la columna de líquido

A partir de la fórmula se observa que si la densidad efectiva del medio es constante, la única variable es  $h$ . Así, la presión es directamente proporcional a la altura  $h$ , es decir, al nivel del líquido en el tanque.

La presión hidrostática de la columna de líquido se mide directamente con un transmisor de presión o de presión diferencial.



**Figura 1.7** Medidor Manométrico y de Presión diferencial.

La medición de nivel con transmisor de presión se utiliza preferentemente en tanques abiertos expuestos a la atmósfera. En este caso, la presión medida es igual a la presión de la columna de líquido más la presión atmosférica. La presión atmosférica suele ser despreciable porque la mayoría de los sensores de presión disponen de dispositivos que compensan dicha presión.

Para este caso los transmisores se montan en la parte más baja del tanque.

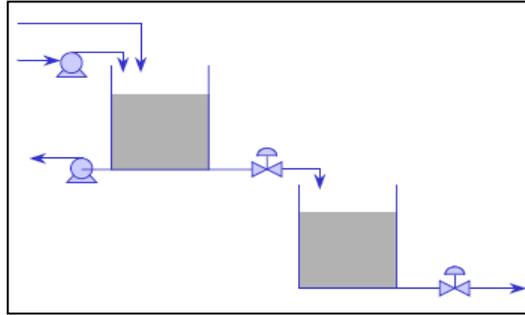
## 1.2 SISTEMAS INTERACTIVOS Y NO INTERACTIVOS

Los sistemas de orden superior pueden ser interactivos o no; en este capítulo se presentan ejemplos de ambos tipos, mediante la descripción de algunos procesos reales. También se explica el significado de los términos interactivo y no interactivo.

El ejemplo típico de un sistema no interactivo es el sistema de tanques que se muestra en la figura 1.8; se deben determinar las funciones de transferencia que relacionan el nivel del segundo tanque con el flujo de entrada al primer tanque,  $q_i(t)$ , y el flujo de la bomba,  $Q_0(t)$ .

En este ejemplo todos los tanques están abiertos a la atmósfera y el proceso es isotérmico. La apertura de las válvulas permanece constante y el flujo de líquido a través de las válvulas se expresa mediante:

$$q(t) = \frac{C_v}{7.48} \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G}} = \frac{C_v}{7.48} \sqrt{\frac{\rho g h(t)}{144 g_c G}} = C'_v \sqrt{h(t)}$$

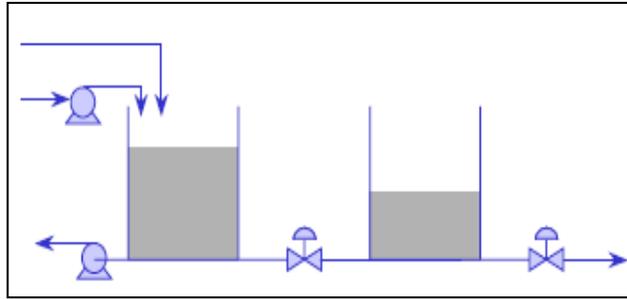


**Figura 1.8** Sistema no interactivo Proceso con dos tanques en cascada.

Los procesos que se muestran en las figura 1.8 se conoce como sistemas no interactivos, porque no hay interacción completa entre las variables. El nivel del primer tanque afecta al del segundo; pero el nivel de éste no afecta al del primero. En la siguiente sección se presentan ejemplos de sistemas interactivos.

Si se redistribuyen los tanques de la figura 1.8, el resultado es un sistema interactivo como el mostrado en la figura 1.9. La interacción entre los tanques se demuestra claramente a partir de la ecuación de flujo de la válvula,  $Q_1(t)$ , es decir:

$$q_1(t) = \frac{C_{v1}}{7.48} \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G}} = \frac{C_{v1}}{7.48} \sqrt{\frac{\rho g (h_1(t) - h_2(t))}{144 g_c G}} = C'_{v} \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}$$



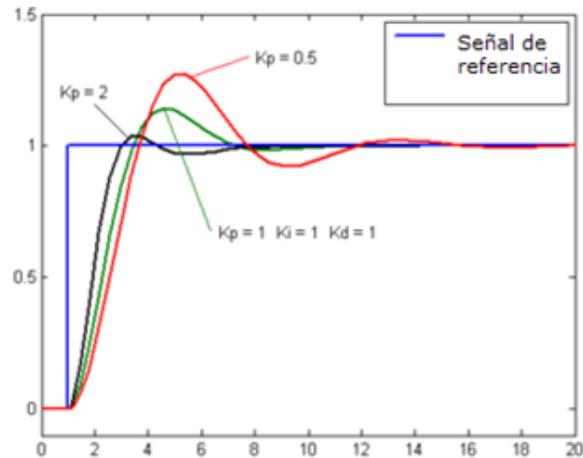
**Figura 1.9** Sistema Interactivo Proceso con dos Tanques en Paralelo.

## **1.3 CONTROLADORES PID**

### **1.3.1 Acción de Control Proporcional (P)**

La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango. Sin embargo, existe también un valor límite en la constante proporcional a partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados. Este fenómeno se llama sobre oscilación y, por razones de seguridad, no debe sobrepasar el 30%, aunque es conveniente que la parte proporcional ni siquiera produzca sobre oscilación. Hay una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (la válvula se mueve al mismo valor por unidad de desviación). La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al

tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.



**Figura 1.10** Gráficos de la variable del proceso con ganancia P.

La fórmula del proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p e(t) \quad (1.1)$$

El error, la banda proporcional y la posición inicial del elemento final de control se expresan en tanto por uno. Nos indicará la posición que pasará a ocupar el elemento final de control.

### 1.3.2 Acción de Control Integral (I)

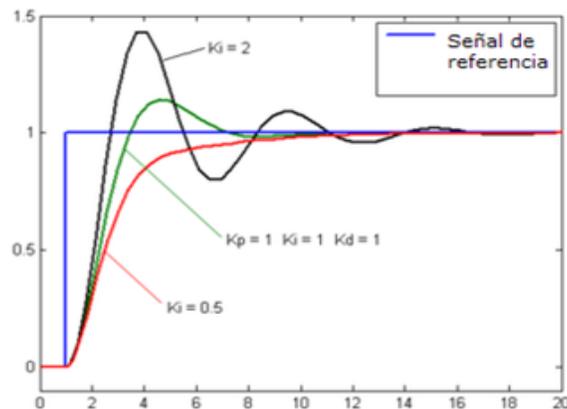
El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El *error* es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; Luego es multiplicado por una constante **I**. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

El modo integral presenta un desfase en la respuesta de  $90^\circ$  que sumados a los  $180^\circ$  de la retroalimentación ( negativa ) acercan al proceso a tener un retraso de  $270^\circ$ , luego entonces solo será necesario que el tiempo muerto contribuya con  $90^\circ$  de retardo para provocar la oscilación del proceso. <<<la ganancia total del lazo de control debe ser menor a 1, y así inducir una

atenuación en la salida del controlador para conducir el proceso a estabilidad del mismo. >>> Se caracteriza por el tiempo de acción integral en minutos por repetición. Es el tiempo en que delante una señal en escalón, el elemento final de control repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional.

La fórmula del integral está dada por:

$$I_{sat} = K_i \int_0^t e(t) d\tau \quad (1.2)$$



**Figura 1.11** Gráficos de la variable del proceso con ganancia PI.

### 1.3.3 Acción de Control Derivativa (D)

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral).

El *error* es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna, o "*Set Point*".

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante **D** y luego se suma a las señales anteriores (P+I). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente.

La fórmula del derivativo está dada por:

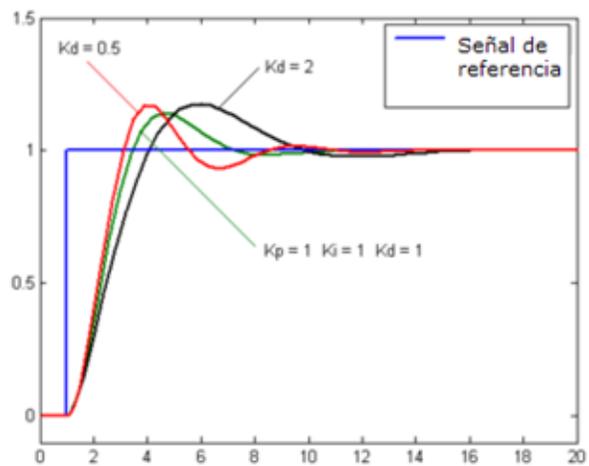
$$D_{sal} = K_d \frac{de}{dt} \quad (1.3)$$

El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada.

Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso. Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva.

El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones.

La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso. Puede emplearse en sistemas con tiempo de retardo considerables, porque permite una repercusión rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.



**Figura 1.12** Gráficos de la variable del proceso con ganancia D.

### 1.3.4 Acción de control proporcional Integral (PI)

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativa la señal de control será decreciente.

Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón. Se define mediante:

$$\mu(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (1.4)$$

Donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.5)$$

### 1.3.5 Acción de control proporcional Derivativa (PD)

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error sea estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable. Se define mediante:

$$\mu(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Donde  $T_d$  es una constante de denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador.

La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

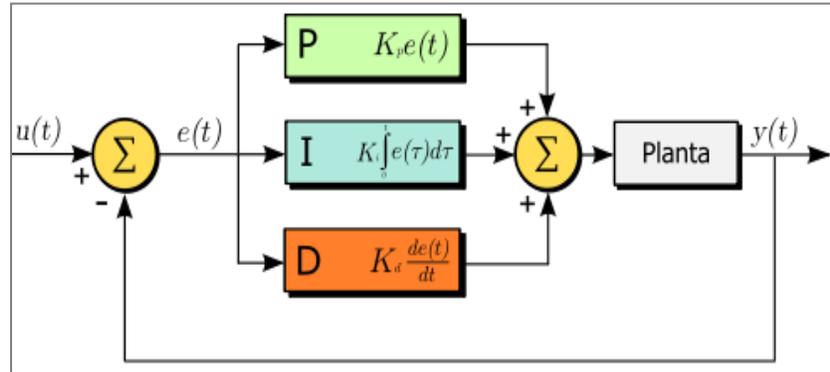
$$C_{PD}(s) = K_p + sK_pT_d \quad (1.7)$$

### **1.3.6 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)**

Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La

suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo. Algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas.

Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.



**Figura 1.13** Gráficos de la variable de proceso con ganancia PID.

$$\mu(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.9)$$

### 1.3.7 Funcionamiento de un Controlador PID

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos:

1. Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc).
2. Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
3. Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc).

El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el *punto actual* en el que se encuentra el proceso o sistema. La señal puede representar ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia. En este último caso la señal es de corriente alterna, a diferencia de los dos anteriores, que son corriente continua.

### **1.3.7.1 Significado de las constantes**

P constante de proporcionalidad: se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional. Ejemplo: Cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable respecto al punto de consigna. La señal P, mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la ganancia.

I constante de integración: indica la velocidad con la que se repite la acción proporcional.

D constante de derivación: hace presente la respuesta de la acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El valor indicado por la constante de derivación es el lapso de tiempo durante el cual se manifestará la acción proporcional correspondiente a 2 veces el error y después desaparecerá.

### 1.3.8 Método relé (Aström-Hägglund)

En este método se aplica un relé con amplitud de pico a pico  $2.h$  para conseguir los valores de  $K_{po}$  y  $T_o$ .

Este control da una oscilación ante una entrada escalón, que será una señal oscilatoria de periodo  $T_o$  y de amplitud  $A$ , que sustituyendo en la fórmula (1.10) se obtiene el valor de  $K_{po}$ .

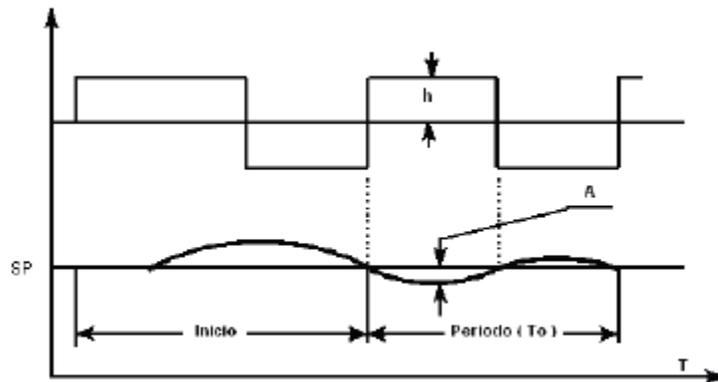
$$K_{po} = \frac{4.h}{\pi.A} \quad (1.10)$$

Posteriormente se aplica la Tabla 1:

<b>Tipo de Controlador</b>	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>P</b>	0.8.Kpo	$\infty$	0
<b>PI</b>	0.45.Kpo	$\frac{1}{1.2}.T_o$	0
<b>PID</b>	0.6.Kpo	0.5.To	0.125.To

**Tabla1** Ajuste de los parámetros PID

En la figura 1.14 Se observa los parámetros característicos del ensayo para el método del relé.



**Figura 1.14** Grafica oscilaciones técnica relé.

#### 1.4 LINEALIZACIÓN DE FUNCIONES

Cuando se requiere realizar un análisis dinámico de sistemas no lineales, puede tomarse en cuenta las siguientes alternativas:

1. Transformar el sistema no lineal en uno lineal haciendo una transformación adecuada.
2. Simular el sistema no-lineal usando una computadora analógica o digital y calcular su solución numéricamente.

3. Desarrollar un sistema lineal que aproxime el comportamiento dinámico del sistema no-lineal alrededor de un punto específico de operación.

Linealización es el proceso matemático que permite aproximar un sistema no-lineal.

Esta técnica es ampliamente usada en el estudio de procesos dinámicos y en el estudio de sistemas de control por las siguientes razones:

1. Se cuenta con métodos analíticos generales para la solución de sistemas lineales. Por lo tanto se tendrá una solución general del comportamiento del proceso, independientemente de los valores de los parámetros y de las variables de entrada. Esto no es posible en sistemas no-lineales pues la solución por computadora da una solución del comportamiento del sistema valida solo para valores específicos de los parámetros y de las variables de entrada.
2. Todos los desarrollos significativos que conllevan al diseño de un sistema de control ha sido limitado a procesos lineales.

### 1.4.1 VARIABLES DE DESVIACIÓN

Se define la variable de desviación,  $\mathbf{X(t)}$ , como la diferencia entre el valor de la variable o señal  $\mathbf{x(t)}$  y su valor en el punto de operación. Matemáticamente se define:

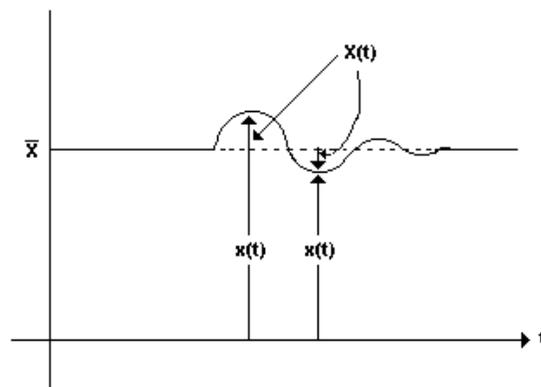
$$X(t) = x(t) - \bar{x}$$

Donde:

$X(t)$ : variable de desviación.

$x(t)$ : variable absoluta correspondiente

$\bar{x}$  El valor de  $x$  en el punto de operación (valor base)



**Figura 1.15** Gráfico de las variables de desviación, variable absoluta y el punto de operación.

El valor base, es el valor de la variable en estado estable y generalmente describe el valor inicial del sistema dinámico y por lo tanto es constante, implicando que:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = 0$$

Por lo tanto derivando  $n$  veces la ecuación, obtenemos:

$$\frac{d^n X(t)}{dt^n} = \frac{d^n x(t)}{dt^n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

El punto de operación generalmente está en estado estacionario, entonces:  $x(o) = \bar{x}$  ,  $\dot{X}(o) = 0$

Por lo tanto:

$$\frac{d^n X(0)}{dt} = 0 \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots$$

y la transformada de Laplace es:

$$L\left[\frac{d^n X(t)}{dt^n}\right] = s^n X(s)$$

Así la ecuación linealizada en función de las variables de desviación no incluye términos constantes.

### 1.4.2 LINEALIZACIÓN DE FUNCIONES DE UNA VARIABLE

Considérese la ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t)] + k$$

Donde  $f[x(t)]$  es una función no-lineal de  $x$ , y  $k$  es una constante.

Expandiendo la función no-lineal  $f[x(t)]$  en series de Taylor alrededor del punto  $\bar{x}$ , se obtiene:

$$f[x(t)] = f(\bar{x}) + \frac{df(\bar{x})}{dx}[x(t) - \bar{x}] + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f(\bar{x})}{dx^2}[x(t) - \bar{x}]^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 f(\bar{x})}{dx^3}[x(t) - \bar{x}]^3 + \dots$$

Esta expansión se evalúa en el punto  $\bar{x}$ .

La aproximación lineal, consiste en eliminar todas las derivadas de orden dos y mayores, entonces el valor aproximado de la función será:

$$f[x(t)] \approx f(\bar{x}) + \frac{df(\bar{x})}{dx}[x(t) - \bar{x}]$$

El error introducido en la aproximación es del mismo orden de la magnitud del término:

$$I = \frac{1}{2} \frac{d^2 f(\bar{x})}{dx^2} [x(t) - \bar{x}]^2$$

Por lo tanto la aproximación lineal, dada en la ecuación, es satisfactoria cuando  $x$  es muy cercano a  $\bar{x}$ , pues en ese caso el valor del término "I" es muy pequeño.

Geoméricamente, la aproximación es una línea recta que pasa por el punto de operación, generalmente corresponde al valor de estado estacionario, entonces:  $x(0) = \bar{x}$  ,  $X(0) = 0$

Por lo tanto:  $\frac{d^n X(0)}{dt^n} = 0$  para  $n = 1, 2, 3, \dots$

por el punto  $(\bar{x}, f(\bar{x}))$ , con pendiente  $df(\bar{x})/dx$  y es por definición tangente a la curva en el punto de operación. Por lo tanto, la aproximación es exacta solo en el punto de operación.

La aproximación linealizada, correspondiente a la ecuación original, resulta ser:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(\bar{x}) + \frac{df(\bar{x})}{dx} X(t) + k$$

Si las condiciones iniciales son:

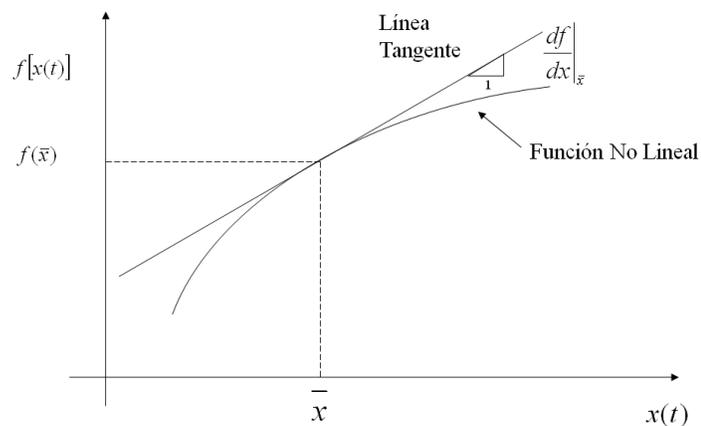
$$x(0) = \bar{x} \quad , \quad dx(0)/dt = 0, \quad X(0) = 0, \quad \text{entonces : } 0 = f(\bar{x}) + k$$

Finalmente, la ecuación inicial, se ha transformado en:

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{df(\bar{x})}{dx} X(t)$$

Puede observarse de la ecuación anterior, que los términos constantes en la ecuación linealizada quedan eliminados cuando el valor base es la condición inicial de estado estacionario.

La aproximación lineal es tangente a la función no lineal en el valor base,  $\bar{x}$ .



**Figura 1.16** Aproximación lineal.

## 1.5 ACTUADORES

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica o gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas. Existen tres tipos de actuadores:

- ✓ Hidráulicos
- ✓ Neumáticos
- ✓ Eléctricos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simplemente posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren de demasiado equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las 30 aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento. Los actuadores eléctricos también son muy utilizados en los aparatos mecatrónicos como por ejemplo, en los robots. Los servomotores de corriente alterna CA sin escobillas se utilizarán en el futuro como actuadores de

posicionamiento preciso debido a la demanda de funcionamiento sin tantas horas de mantenimiento.

Por todo esto, es necesario conocer muy bien las características de cada actuador para utilizarlo correctamente de acuerdo a su aplicación específica.

En el caso de la planta que aquí implementamos, el tipo de actuador que se utiliza es eléctrico, ya que se trata de un pequeño motor DC el cual se comportara como Bomba de agua, y se controlará el caudal de este a través de un control PWM.

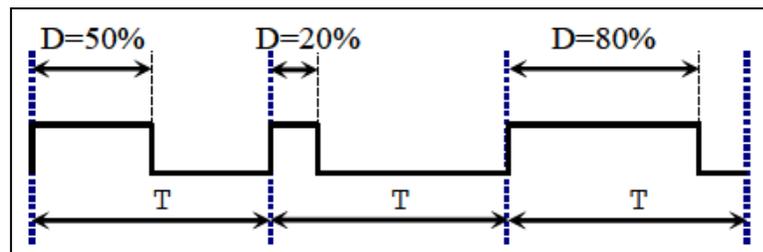
## **1.6 CONTROL CON PWM**

La modulación por ancho de pulso (*pulse width modulation: PWM*) es un tipo de control que se puede utilizar para el control de motores eléctricos de continua. En esta práctica lo utilizaremos para controlar la intensidad de un LED y, si tienes ganas, podrías utilizarlo para controlar la velocidad de un pequeño motor eléctrico.

### 1.6.1 Funcionamiento del PWM

Explicaremos de manera simplificada el funcionamiento de un PWM, ya que el proyecto constará de una bomba de agua que en sí es un motor DC. Los parámetros fundamentales del PWM son el periodo ( $T$ ) y el ciclo de trabajo ( $D$ ). El ciclo de trabajo indica el tiempo que la función vale uno respecto al tiempo total (el periodo).

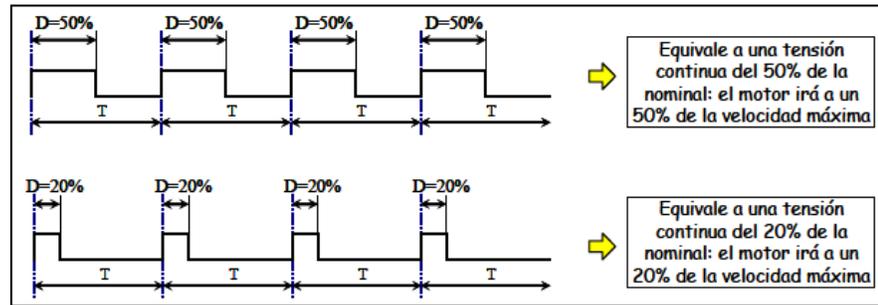
La Figura 1.17 muestra tres ciclos de trabajo distintos. Observa que el periodo del PWM se mantiene constante, y lo que cambia es el tiempo en que la señal se mantiene a uno respecto al periodo total.



**Figura 1.17** Señal PWM que se le ha cambiado el ciclo de trabajo.

Si el periodo del PWM es suficientemente pequeño, el dispositivo que está gobernado (por ejemplo, el motor) no notará las variaciones de la tensión y el resultado es que el motor recibirá

una corriente promedio dada por el ciclo de trabajo. La Figura 1.18 muestra dos PWM con ciclos de trabajo distintos.



**Figura 1.18** Control de velocidad con PWM.

Por medio de la técnica de modulación de ancho de pulso se puede realizar un control para sistemas que están a larga distancia ya que se puede evitar la interferencia proveniente del exterior permitiendo realizar un control de la forma más óptima.

La ventaja de utilizar el ancho de pulso como control de una variable, es que no se ve afectada por ruido eléctrico, inyectado a lo largo de la línea de transmisión, sin importar si la amplitud del pulso se ve reducida por el ruido externo o por la misma resistencia de la línea de transmisión; ya que el circuito no está observando la amplitud de la señal si no la frecuencia que ésta posee además del ancho de pulso  $T_{on}$  o  $T_{off}$ .

El circuito que recibe la señal modulada permite transformar la serie de pulsos en una señal análoga, el cual es llamado circuito demodulador de ancho de pulso. Para un mejor control el Ton mínimo o Toff mínimo debe ser al menos el 10% del periodo y el Ton máximo 90%.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA**

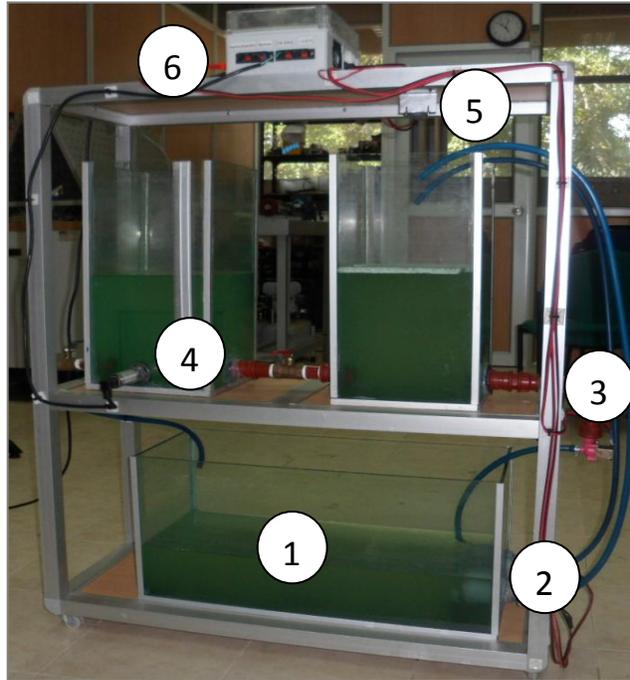
#### **2.1 Montaje de la planta**

El sistema de la planta de control de nivel vasos comunicantes consiste en el control de nivel de un líquido en el segundo tanque por medio de un controlador diseñado con las herramientas del software Labview. El controlador está diseñado para ejecutarse en un computador mediante el uso de las herramientas del software Labview.

En la Figura 2.1 tenemos el modelo de la planta el cual está constituido por varios componentes:

- 1.- Tanques
- 2.- Bombas DC
- 3.- Electroválvula
- 4.- Transmisor de Presión
- 5.- Sensor de Proximidad

## 6.- Circuitos de Acondicionamiento de señales.



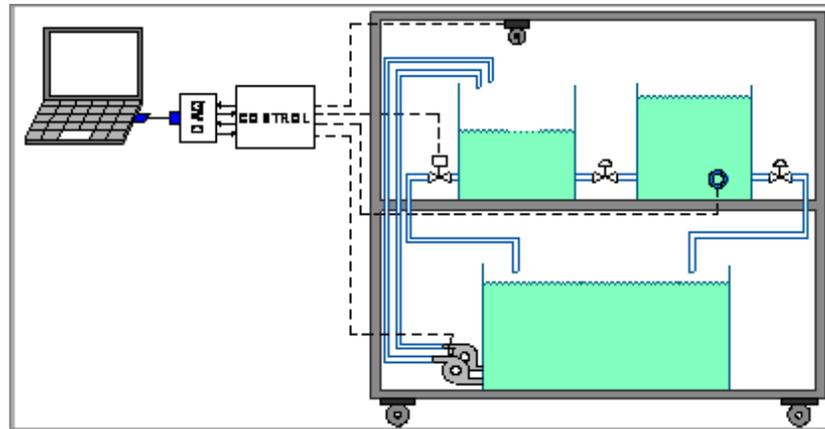
**Figura 2.1** Planta de Nivel configuración Vasos Comunicantes.

El tanque en el cual se va a realizar el control de nivel es llenado a través de una bomba DC a 12v, la cual es controlada por un control PWM para variar el caudal que esta bomba entrega al primer tanque 1 que a su vez entrega líquido al segundo tanque al cual evaluaremos el nivel. La medición del nivel de líquido en el segundo tanque es realizada a través de un transmisor de presión, la señal emitida por el

transmisor de presión se realimenta al controlador cargado en el computador mediante una tarjeta de adquisición de datos.

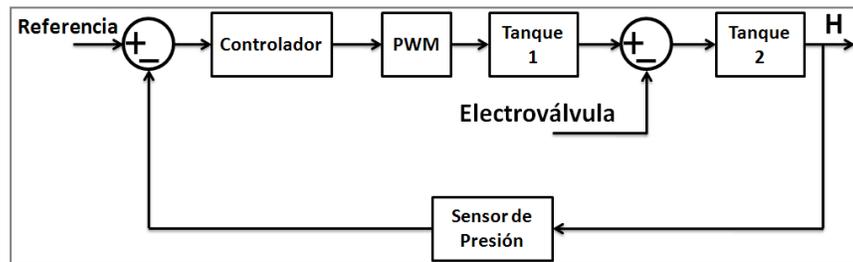
El controlador al recibir la señal de medición de nivel, compara el valor de esta señal con una señal de referencia la cual es colocada por el usuario mediante software, realiza la operación de control necesaria de acuerdo al resultado obtenido por la comparación y envía una señal de control hacia el actuador de la planta. El actuador de la planta está representado por la combinación de la bomba con el control PWM, es así que el controlador actúa directamente al control PWM, que para este caso sería el Duty Cycle para de este modo variar el caudal de entrega al primer tanque y por consiguiente el nivel de líquido al segundo tanque.

La perturbación del sistema, que sirve para observar la capacidad de respuesta de la planta, está a cargo de una electroválvula que simula el caudal de consumo del primer tanque. Abriendo y cerrando esta válvula logramos perturbar el sistema, y observar la respuesta del mismo. La figura 2.2 muestra el esquema de la planta de control de nivel.



**Figura 2.2** Esquema de la planta de control de nivel.

En la figura 2.3 podemos observar un diagrama de bloques general de la planta de control de nivel. En el lado izquierdo tenemos la señal de Referencia la cual nos indica el valor al cual deseamos opere la planta, e representa la diferencia entre la señal de Referencia y la variable real medida, u representa la señal actuante sobre la planta, HP representa la variable que medimos en la planta que en este caso es la presión manométrica y que es proporcional al nivel de líquido en el tanque, HI representa la señal de corriente que genera el transmisor de presión y que es proporcional al nivel de líquido en el tanque.



**Figura 2.3** Diagrama de bloques general de control de nivel de la planta.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA

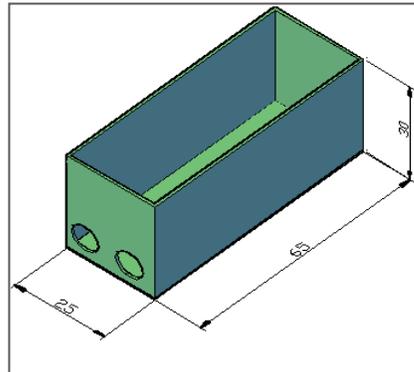
### 2.2.1 Tanques

En esta Planta se hace uso de 3 tanques:

1. Tanque de reserva
2. Tanque 1
3. Tanque 2

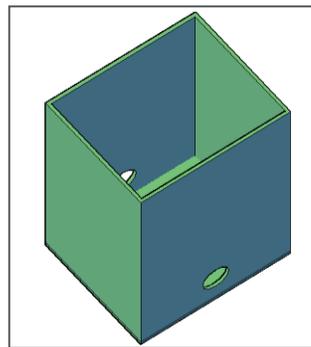
En el tanque de reserva, se tiene el suministro de agua necesaria para alimentar al sistema sus medidas son: 65x25x30cm.

El tanque de reserva cuenta con dos orificios en una de sus caras, ya que ahí van montadas las bombas DC.



**Figura 2.4** Tanque de reserva.

Los tanques 1 y 2 son los que van a estar comunicados entre sí, y realizamos énfasis en el segundo tanque al cual se va proceder a realizar el control de nivel, cabe recalcar que los tanques son del mismo tamaño y sus medidas son 25x25x45.



**Figura 2.5** Tanque Principal.

### 2.2.2 Válvula Solenoide

La válvula electromagnética experimental, con conexiones de 90 grados, necesita una presión al comienzo. La válvula electromagnética también es conveniente para medios del agua: Válvula de la lavadora, válvula electromagnética del agua, válvula electromagnética líquida, válvula electromagnética del piloto, etc.



**Figura 2.6** *Válvula Solenoide.*

Algunas características de ésta son:

1. Medios de funcionamiento: Agua, patrón del movimiento del líquido.
2. Presión de funcionamiento: 0.2-8bar.
3. Resistencia de presión máxima: 8bar.
4. Material del cuerpo: Plástico.
5. Material del anillo de cierre: NBR.
6. Voltaje de Alimentación de la bobina: 115 VAC.

### 2.2.3 Transmisor de Presión

Es un Dispositivo destinado a convertir y transmitir una señal de presión, en una variación de corriente 4-20 [mA] a dos hilos para alimentarse y enviar la señal convertida al medidor.

Aprovecha los avances existentes en el campo de los sensores cerámicos con membrana de aluminio que permiten mantener unas excelentes prestaciones.



**Figura 2.7** Transmisor de Presión.

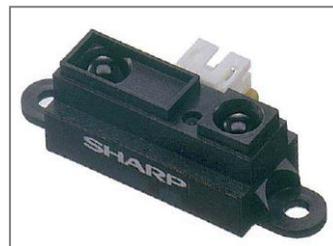
Algunas características son:

- Exactitud :  $\pm 2\%$  del Spam
- Conexión a proceso :  $\frac{1}{2}$ " GAS
- Protección encapsulado : IP-65
- Salida : 4-20 [mA]
- Conexión Eléctrica : 2 hilos vía conector DIM

- Tensión de alimentación : entre 11 y 40 Vcc
- Carga máxima : 600  $\Omega$  a 24 V
- Linealidad :  $\pm 0.2\%$  del Spam
- Deriva térmica :  $< 0.015\%$  /  $^{\circ}\text{C}$
- Margen de Temperatura Compensada : -10 a 55  $^{\circ}\text{C}$
- Temperatura trabajo del Sensor : máx. -25 a +85  $^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de Respuesta :  $\leq 3$  ms
- Resistencia a vibraciones : (IEC 68-2-6)  
1.5 mm (10-55Hz), 20 g (55 Hz- 2 KHz)

#### 2.2.4 Sensor de proximidad GP2Y0A21YK0F

Este es un sensor que mide distancia, compuesto por una combinación integrada de PSD (position sensitive detector), IRED (infrated emitting diode) y un circuito procesador de señales.

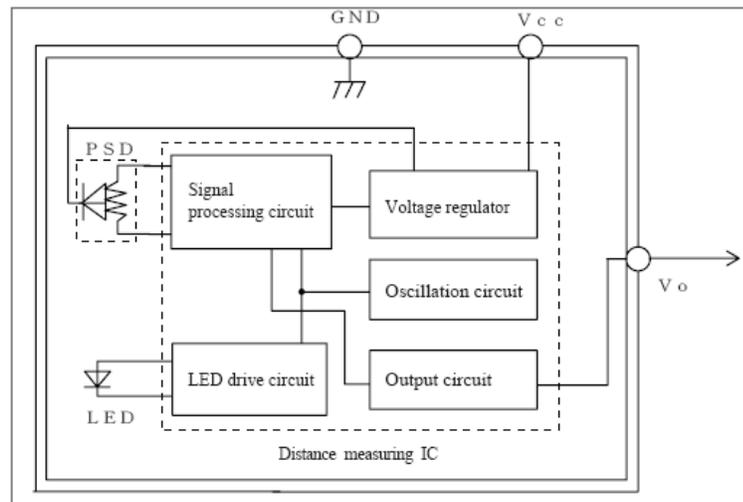


**Figura 2.8** Sensor de Proximidad.

Algunas especificaciones:

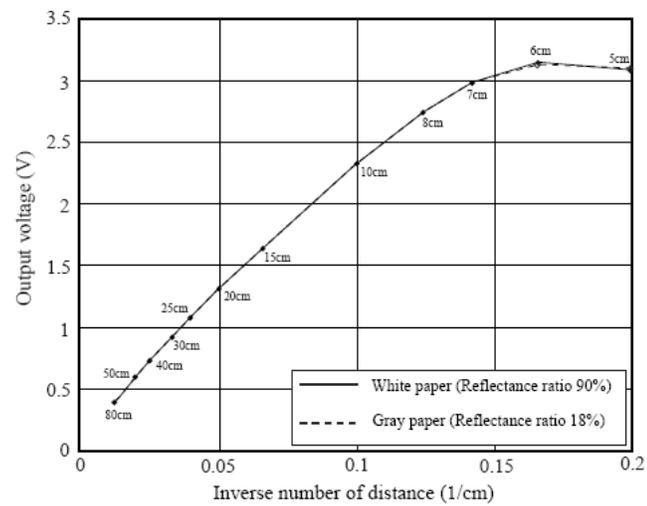
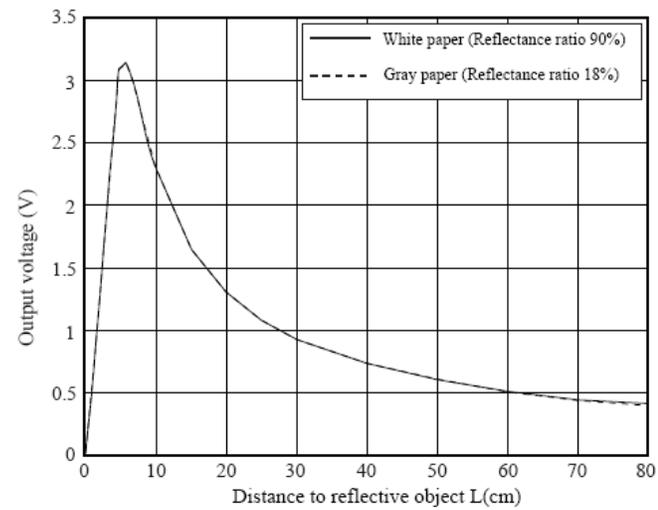
1. Rango de distancia medida: 10 a 80 cm
2. Tipo de salida análoga
3. Consumo de corriente: 30 mA
4. Suministro de voltaje: 4.5 a 5 V

**Diagrama de bloques:**



**Figura 2.9** Diagrama de bloques del sensor de presión.

### Características de salida:



**Figura 2.10** Características del sensor de Proximidad.

### 2.2.5 Bombas DC

La bomba a utilizarse es la misma bomba que se utiliza en los automóviles, esta bomba funciona a 12[v].



**Figura 2.11** Bomba con Motor de Corriente Continua.

### 2.2.6 Computador

Se trata de un computador personal, este computador contiene todos los requerimientos que necesita el software labview versión 2010 para poder ejecutarse sin ningún problema, además de manera opcional otros programas como Proteus que es muy utilizado en este proyecto. En este computador se lleva a cabo la ejecución del programa de Labview que contiene el controlador para la planta de control de nivel.

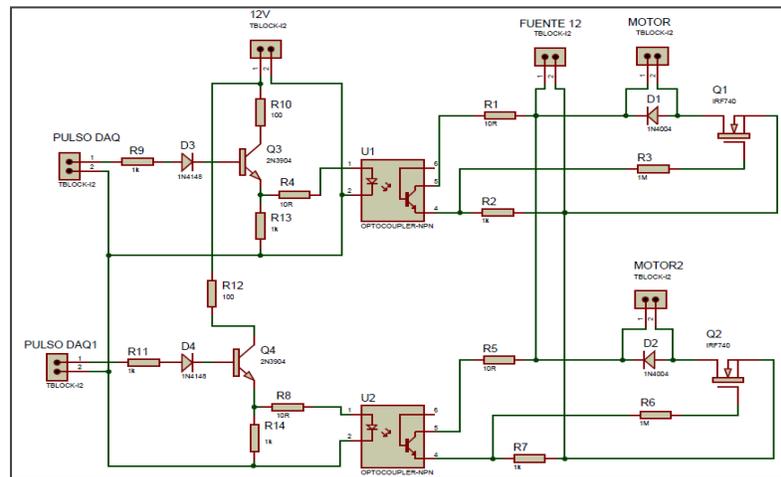
## 2.2.7 DISEÑO ELECTRÓNICO

En este sistema de control de nivel, configuración vasos comunicantes se realiza un acondicionamiento para las señales de entrada y salida de la DAQ, además se diseña una fuente para alimentación con salida de 12 VDC.

### 2.2.7.1 Diseño del circuito de Aislamiento de Control:

#### Salida PWM y Fuerza: Troce ador Clase A

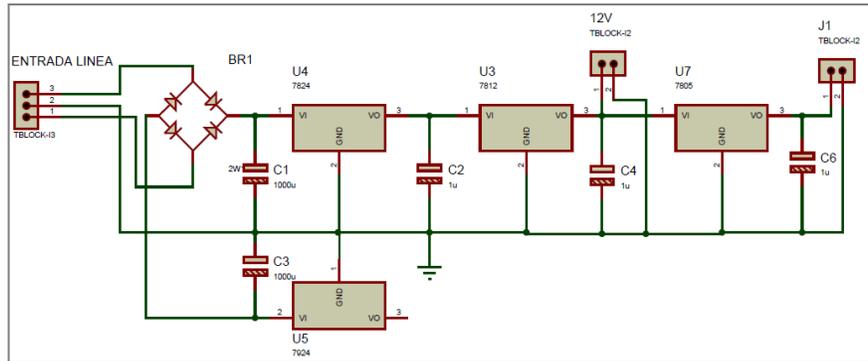
A continuación se tiene un circuito que permite aislar la etapa de control y de fuerza de las bombas DC.



**Figura 2.12** Circuito de Control y Fuerza para las bombas DC.

Se trata de un diseño electrónico el cual su principio fundamental es aislar dos etapas, una etapa de control la cual nos provee el programa labview a través de la tarjeta de adquisición COMPACT DAQ modelo NI cDAQ-9172 para entradas analógica 9201 y para salida analógica 9263 y la otra etapa que vendrá a ser la que realice la fuerza, optamos por aislar dichas etapas para evitar futuros daños en la tarjeta de adquisición. El primer transistor conmuta de acuerdo al pulso que provee la DAQ y a su vez por medio del opto que conmutará sincrónicamente con el transistor, hará conmutar al Mosfet de potencia que está ligado directamente la bomba, la bomba recibe el voltaje promedio de este pulso que le llega y dependiendo de este promedio variará su velocidad.

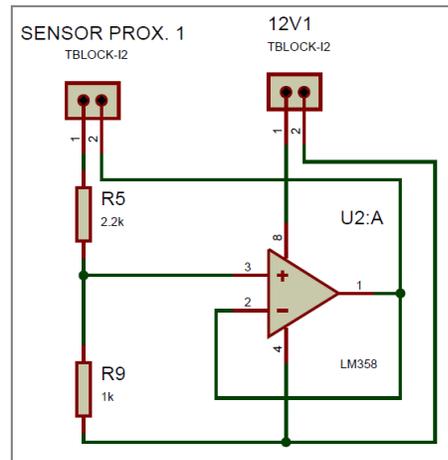
### 2.2.7.2 Diseño del circuito de Alimentación con Salida a 12 VDC



**Figura 2.13** Fuente de alimentación con Salida a 12 VDC.

Se trata de una fuente 12[v] para control, su principio fundamental consiste en el tradicional rectificador de onda completa, la señal alterna llega al puente de diodos y se rectifica para pasar por unos capacitores que cumplen la función de filtros, la siguiente etapa es la de regular esa señal hasta los 15[v] para proceder a colocar otro regulador de serie para poder obtener los 12[v] para el control del sistema, este procedimiento de colocar 2 reguladores en serie es común para este tipo de fuentes. Todo el control se lo hace a 12v porque los elementos que utilizamos funcionan a ese voltaje.

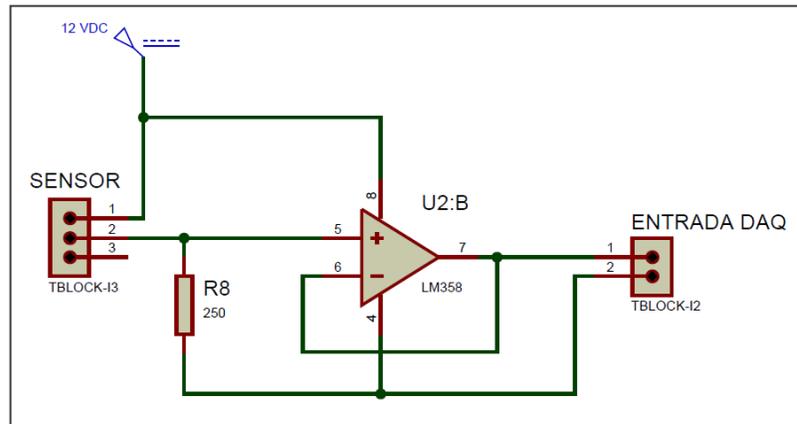
### 2.2.7.3 Diseño del circuito de Acondicionamiento para la Señal del Sensor de Proximidad



**Figura 2.14** Circuito de Acondicionamiento para la señal del Sensor de Proximidad.

Se trata de un circuito que recibe señal de un transductor, el cual envía una señal que cambia con la posición basado en el principio de emisión y recepción de señal. Esta es acondicionada por medio de un amplificador operacional y luego esta es enviada a la DAQ.

### 2.2.7.4 Diseño del circuito de Acondicionamiento para la Señal del Transmisor de Presión



**Figura 2.15** Circuito de Acondicionamiento para la señal del Transmisor de Presión.

Se trata de un circuito el cual su principio fundamental es acoplar la señal de corriente de 4 a 20 [mA] que provee el sensor de presión a una señal de voltaje, utilizamos un operacional con una resistencia para acoplar dicha señal a la tarjeta de adquisición, esto se realizo porque la tarjeta recibe señales de voltaje, mas no de corriente.



### **2.2.8 SOFTWARE LABVIEW**

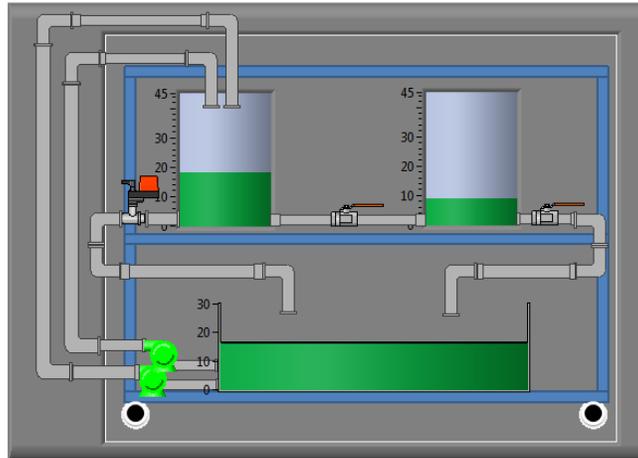
Labview es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

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 versión actual 8.6, publicada en agosto de 2008, cuenta también con soporte para Windows Vista.

Los programas desarrollados con Labview se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, 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.

Es así que Labview permite desarrollar una amplia gama de mediciones que van desde mediciones de Temperatura, Voltaje, Resistencia, Presión, y Corrientes. En siguiente figura se observa el panel frontal de una aplicación para la medición de la señal de voltaje proporcionada por un transmisor de presión.



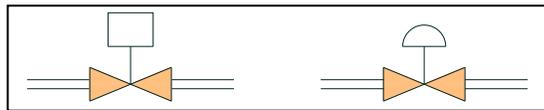
Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer (programas) relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con Labview y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él.

## CAPÍTULO 3

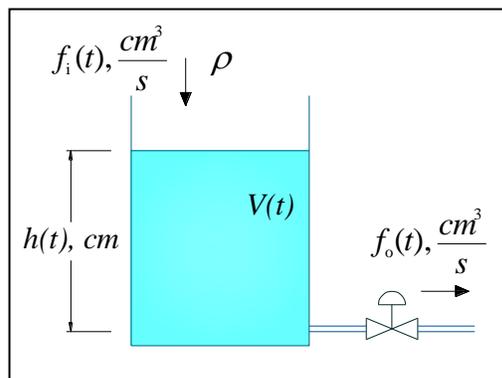
### 3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIAS

#### 3.1 Tanque-Válvulas

A continuación se procede a calcular la Función de Transferencia para un sistema Tanque-Válvula mostrado en la figura 3.2



**Figura 3.1** Válvula Solenoide y Manual.



**Figura 3.2** Sistema Tanque-Válvula.

El flujo de masa que entra al proceso menos el Flujo de masa que sale es igual a la tasa de acumulación de masa en el proceso:

$$\rho f_i(t) - \rho f_o(t) = \rho \frac{V(t)}{dt} \quad \therefore V(t) = Ah(t)$$

$$f_i(t) - f_o(t) = A \frac{h(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Aplicando variables de desviación a la ecuación 3.1 se obtiene:

$$(f_i(t) - \bar{f}_i) - (f_o(t) - \bar{f}_o) = A \frac{h(t)}{dt}$$

$$F_i(t) - F_o(t) = A \frac{H(t)}{dt} \quad (3.2)$$

El flujo de salida  $f_o$  está dado por:

$$f_o(t) = C_v \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G_f}}$$

Se analiza la presión en el punto de la válvula:

$$\Delta P(t) = P_a + \rho g h(t) - P_a$$

$$f_o(t) = C'_v \sqrt{h(t)} \quad \Rightarrow \quad C'_v = C_v \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}}$$

En general para flujos turbulentos, el Flujo es de la siguiente forma:

$$f_o(t) = C\sqrt{h} \quad (3.3)$$

En este caso:

$$C = C_v'$$

Se Linealiza la Ecuación 3.3:

$$f_o(t) = \bar{f}_o + \left. \frac{\partial f_o(t)}{\partial h(t)} \right|_{s_i} H(t)$$

$$f_o(t) = \bar{f}_o + \frac{1}{2} Ch^{-\frac{1}{2}} H(t) \quad \therefore b = \frac{1}{2} Ch^{-\frac{1}{2}}$$

Finalmente:

$$f_o(t) = \bar{f}_o + bH(t) \quad (3.4)$$

Luego se aplica, variables de desviación a la ecuación 3.4, y se tiene:

$$F_o(t) = f_o(t) - \bar{f}_o$$

$$F_o(t) = bH(t) \quad (3.5)$$

A continuación aplicamos Transformada de Laplace a las ecuaciones 3.2 y 3.5, se obtiene:

$$F_i(S) - F_o(S) = ASH(S) \quad (3.6)$$

$$F_o(S) = bH(S) \quad (3.7)$$

Reemplazando la ecuación 3.7 en la 3.6, se tiene:

$$F_i(S) - bH(S) = ASH(S)$$

$$ASH(S) + bH(S) = F_i(S)$$

$$H(S) = \frac{1}{AS + b} F_i(S) \quad \therefore K = 1/b, \tau = A/b$$

$$H(S) = \frac{K}{\tau S + 1} F_i(S) \quad (3.8)$$

### 3.2 Sensor

A continuación se procede a obtener la función de transferencia del sensor, para lo cual experimentalmente se determinó que la relación es lineal.

$$P(s) = k_s V(s)$$

$$V(s) = k_t H(s)$$

$$P(s) = KH(s)$$

Donde:

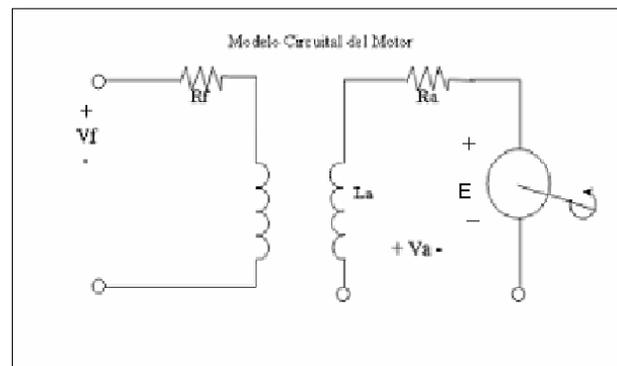
$P(s)$ = Presión de un liquido

$V(s)$ = Voltaje de salida del sensor

$H(s)$ = Altura del liquido

### 3.3 Bomba

El motor de corriente continua es ampliamente utilizado en la industria debido a su facilidad y precisión en el control de diversos procesos, no obstante requiere mantenimiento permanente debido al desgaste de sus piezas mecánicas. Recordemos que una bomba es un motor de corriente continua.



**Figura 3.3** Circuito equivalente de un motor de Corriente Continua.

### 3.3.1 Modelo circuital de un motor de c.c

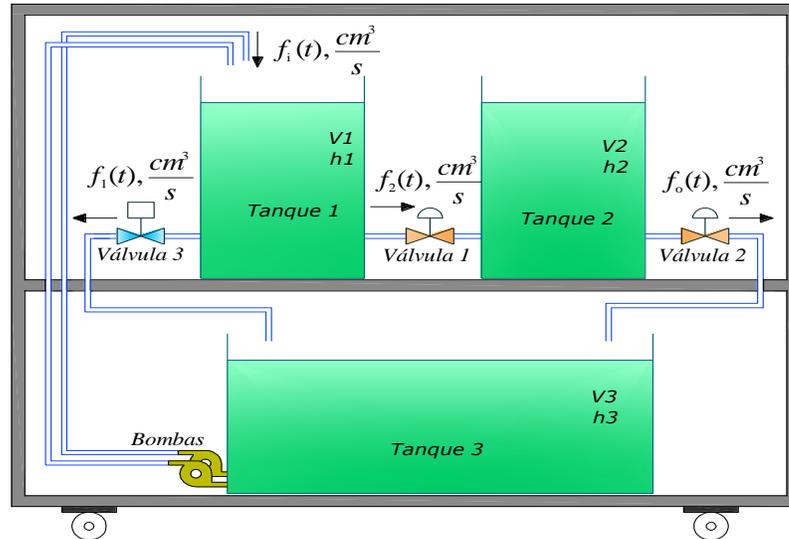
El modelo del motor o función de transferencia que lo caracteriza, relaciona el voltaje de armadura aplicado al motor (entrada) y la velocidad angular del mismo (salida), ahora añadiremos una parte adicional, nuestra salida va a ser caudal ya que estamos utilizando una bomba, y en el dominio de Laplace es la siguiente:

$$H(S) = \frac{\omega(S)}{V_a(S)} = \frac{k}{(R_a + S * L_a)(J * S + b) + k^2}$$

$$H_1(S) = \frac{Q(S)}{\omega(S)}$$

$$H_1(S) = \frac{Q(S)}{\omega(S)} = \frac{k * Q(S) * V_a(S)}{(R_a + S * L_a)(J * S + b) + k^2}$$

### 3.4 Función de Transferencia general de la planta



**Figura 3.4** Diagrama General de la planta.

La función de transferencia del tanque 1 está dada por:

$$\rho f_i(t) - \rho f_2(t) - \rho f_1(t) = \rho \frac{A_1 h_1(t)}{dt}$$

$$F_i(S) - F_2(S) - F_1(S) = ASH_1(S) \quad (3.9)$$

La función de transferencia de la válvula 1 está dada por:

$$f_2(t) = C_v \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G_f}} = C'_v \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} = \bar{f}_2 + aH_1(t) + bH_2(t)$$

$$F_2(S) = aH_1(S) + bH_2(S) \quad (3.10)$$

La función de transferencia del tanque 2 está dada por:

$$\rho f_2(t) - \rho f_o(t) = \rho \frac{A_2 h_2(t)}{dt}$$

$$F_2(S) - F_o(S) = ASH_2(S) \quad (3.11)$$

La función de transferencia de la válvula 2 está dada por:

$$f_o(t) = C_v \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G_f}} = C_v \sqrt{h_2(t)} = \bar{f}_o + cH_2(t)$$

$$F_o(S) = cH_2(S) \quad (3.12)$$

De las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3, y 3.4 se obtiene:

$$\boxed{H_1(S) = \frac{K_1}{\tau S + 1} F_i(S) - \frac{K_1}{\tau S + 1} F_1(S) - \frac{K_2}{\tau S + 1} H_2(S)} \quad (3.13)$$

$$K_1 = 1/a$$

$$\tau_1 = A/a$$

donde  $K_2 = b/a$

$$\tau_2 = A/a$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau$$

$$\boxed{H_2(S) = \frac{K_3}{\tau_1 S + 1} H_1(S)} \quad (3.14)$$

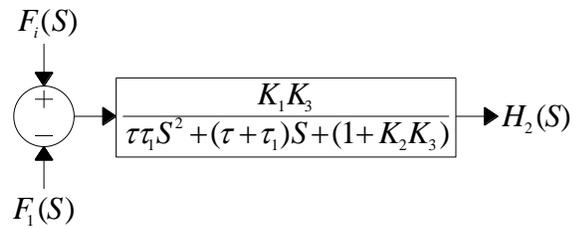
De las ecuaciones 3.5 y 3.6 se obtiene:

$$H_2(S) = \frac{K_1 K_3}{\tau \tau_1 S^2 + (\tau + \tau_1)S + (1 + K_2 K_3)} [F_i(S) - F_1(S)] \quad (3.15)$$

$$\text{donde } K_3 = \frac{a}{c-b}$$

$$\tau_1 = \frac{A}{c-b}$$

### Diagrama De Bloques



## **CAPÍTULO 4**

### **4. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA**

#### **4.1 Introducción a la Identificación de Sistemas**

La identificación de sistemas consiste en obtener modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en datos observados del sistema. Debido a que los sistemas dinámicos son abundantes en nuestro medio, las técnicas de identificación de sistemas tienen una amplia área de aplicación.

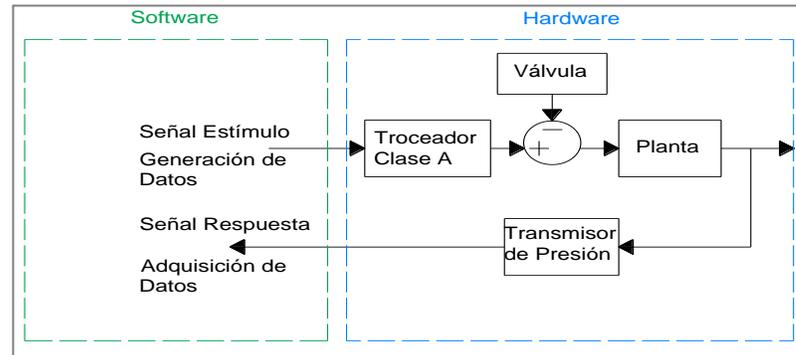
Hoy en día muchos problemas en diferentes campos de estudio son resueltos orientándolos desde un punto de vista de sistema. Es por eso que es muy importante tener un conocimiento acerca de la identificación de sistemas y todas las etapas que esta conlleva para su realización.

Para la realización de este proyecto se prefiere la identificación de la planta por medio de software en lugar de la utilización de leyes físicas, por el hecho de que la primera envuelve la

experimentación, sin dejar de lado que necesariamente para realizar la identificación de la planta se debe tener un conocimiento previo de las leyes que rigen el comportamiento de la misma. Al estar la identificación de la planta estrechamente ligada con la experimentación, se hace uso de las herramientas de adquisición de datos, acondicionamiento de señales, uso de equipos de medición, y aplicación de teoría de control.

Lo que se espera con la identificación de la planta es obtener un modelo que represente las características de la misma para las condiciones en las cuales esta va a trabajar. Una vez hallado un modelo se procederá a trabajar con este para así predecir el comportamiento de la planta ante ciertas situaciones.

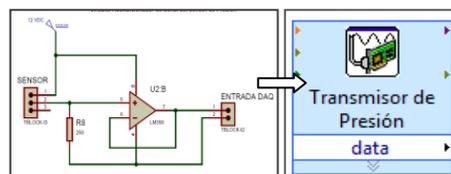
Para la identificación de la planta de control de nivel se tuvo que llevar a cabo el diseño de una etapa de experimentación, en la cual se definió la variable a medirse, la señal estímulo a ser aplicada al sistema, el periodo de experimentación, las asunciones a realizarse, en fin las condiciones bajo las cuales se realizaría el experimento.



**Figura 4.1** Esquema de configuración para identificación de la planta

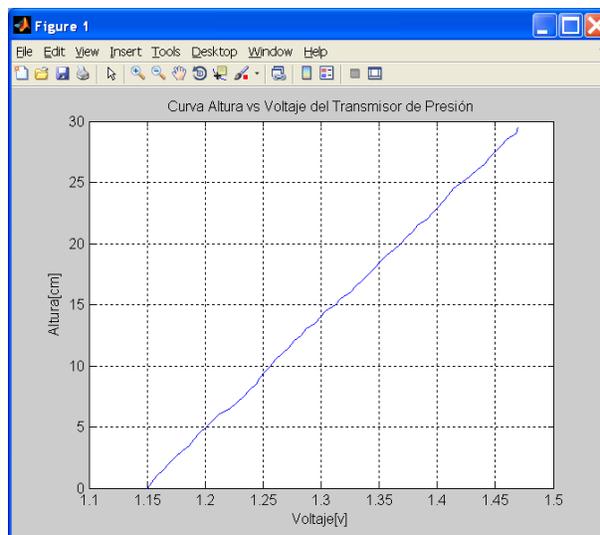
## 4.2 Adquisición de datos

Para adquirir la señal de nivel que genera el transmisor de presión fue necesario acondicionar la señal por medio de un circuito formado por un amplificador operacional Im 358 y luego ser transmitida al modulo de entrada analógicas NI 6201 de la DAQ, como se muestra en la figura 4.2



**Figura 4.2** Adquisición de la señal que entrega el transmisor de Presión.

Debido a que los datos que entrega este transmisor de presión no son tan lineales, fue necesario linealizar estos datos con la ayuda de una herramienta como Matlab, en el cual hicimos uso de la función  $\text{Polyfit}(x,y,n)$ . Donde  $x$  representa un vector de datos,  $y$  son los valores correspondientes a cada  $x$  y  $n$  es el grado del polinomio que se requiere aproximar. Esta función entrega los un arreglo con los coeficientes del polinomio de grado  $n$ , en las figuras 4.3 y 4.4 se muestran la señal sin linealizar y linealizada respectivamente.



**Figura 4.3** Grafica Altura vs Voltaje del Transmisor sin linealizar.

Para encontrar la aproximación lineal del conjunto de datos realizados en esta parte usamos la siguiente función de Matlab:

$$c=\text{polyfit}(a,b,4)$$

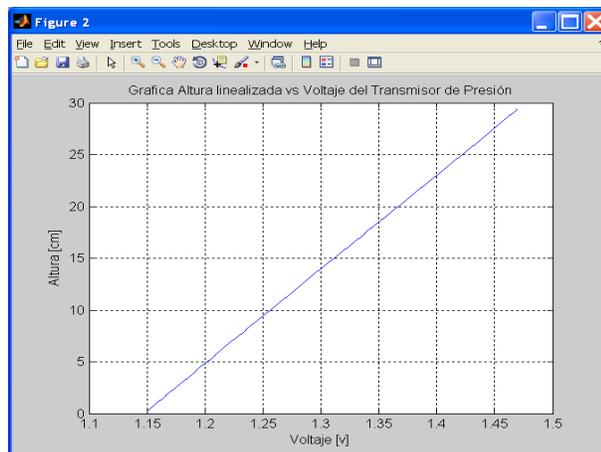
Esto nos da como resultado los siguientes coeficientes:

$$C = 737.2 - 3888.67669.5 - 6622.52092.2$$

Es decir que tenemos el siguiente polinomio para aproximar la altura en función del voltaje medido:

$$A(V) = 737.2 * V^4 - 3888.6 * V^3 + 7669.5 * V^2 - 6622.5 * V + 2092.2$$

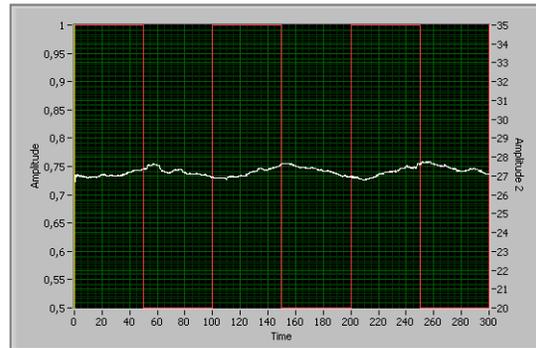
Al graficar la Altura vs Voltaje del transmisor linealizado tenemos la siguiente figura 4.4:



**Figura 4.4** Grafica Altura vs Voltaje del Transmisor linealizada.

### 4.2.1 Señal estímulo aplicada al sistema

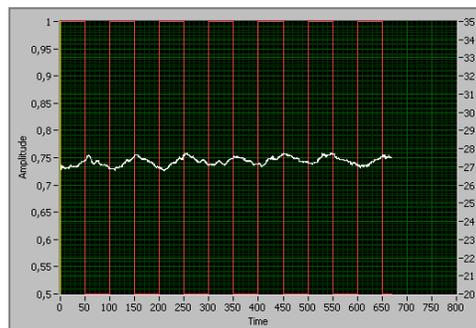
Para determinar el modelo del sistema se aplica una señal de tipo cuadrada con un periodo de 100 segundos, la señal en color rojo en la figura 4.5 es la que se aplica.



**Figura 4.5** Señal estímulo aplicada al Sistema.

### 4.2.2 Señal de respuesta del sistema

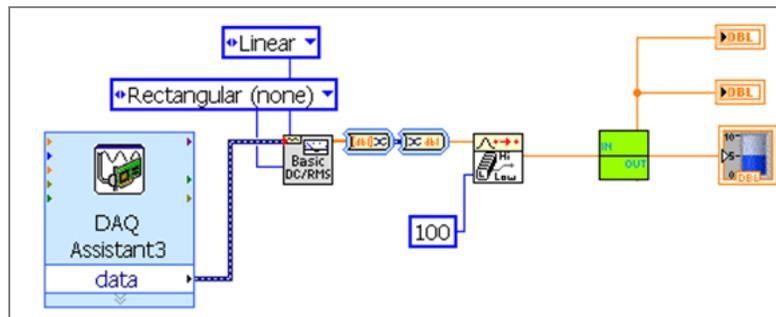
La señal de color blanco de la figura 4.6 es la respuesta del Sistema e decir la altura medida del nivel en el tanque a controlar.



**Figura 4.6** Señal de respuesta del Sistema.

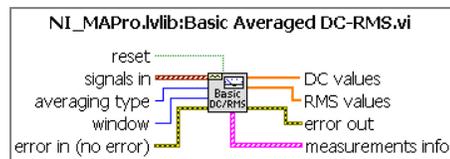
### 4.3 Pre procesamiento de Datos

La señal que envía el transmisor de presión es irregular, por lo que debemos tratarla dentro de la programación en el Diagrama de Bloques. En la siguiente figura 4.7 tenemos los componentes que usamos para tratar la señal medida.

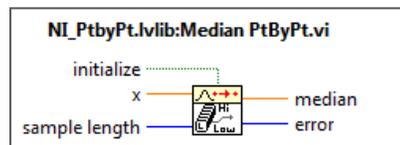


**Figura 4.7** Adquisición de la señal de medida.

Con el siguiente vi de labview logramos obtener un valor promedio de la señal que estamos adquiriendo.



Luego de este bloque la señal se envía a un vi que promedia los valores obtenidos cada 100 datos.



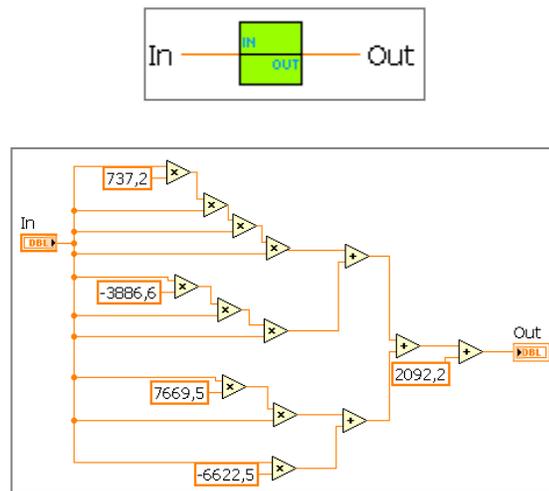
### 4.3.1 Escalamiento de datos

A continuación necesitamos convertir la señal de voltaje que entrega el Transmisor de presión en altura eso lo logramos a través del polinomio:

$$A (V) = 737.2 * V^4 - 3888.6 * V^3 + 7669.5 * V^2 - 6622.5 * V + 2092.2$$

Donde representa A representa la altura y V el voltaje medido, los coeficientes son los valores obtenidos al linealizar la señal que entrega el Transmisor de Presión.

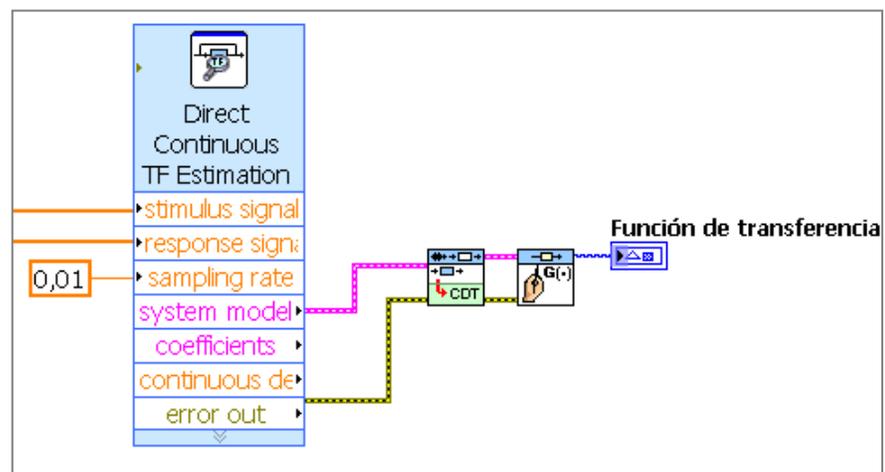
En la figura 4.8 que sigue a continuación se muestra el SubVi que realiza el escalamiento de la señal medida y su salida respectiva.



**Figura 4.8** SubVi convertidor de Voltaje a Altura.

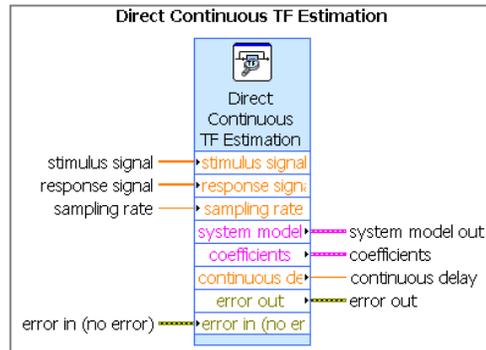
#### 4.4 Selección y Validación del Modelo

Para obtener el modelo de la planta hacemos uso del siguiente Vi, el cual está conformado por: un bloque estimador continuo de función de transferencia, un bloque convertidor de modelo, un bloque que dibuja la función de transferencia y un indicador.

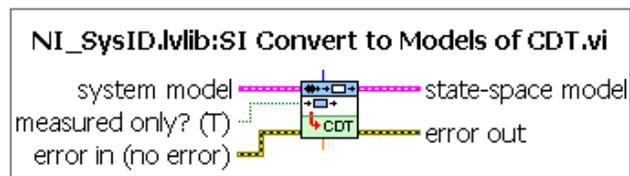


**Figura 4.9** Vi que genera la función de transferencia de la planta.

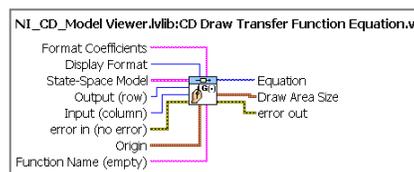
El siguiente bloque estima la función de transferencia de un sistema. Para esto requiere conocer la señal de estímulo y la señal de respuesta del sistema.



El siguiente bloque convierte el modelo previamente identificado en un modelo espacio de estados, el cual se puede manipular ya que se obtiene el polinomio respectivo del modelo.



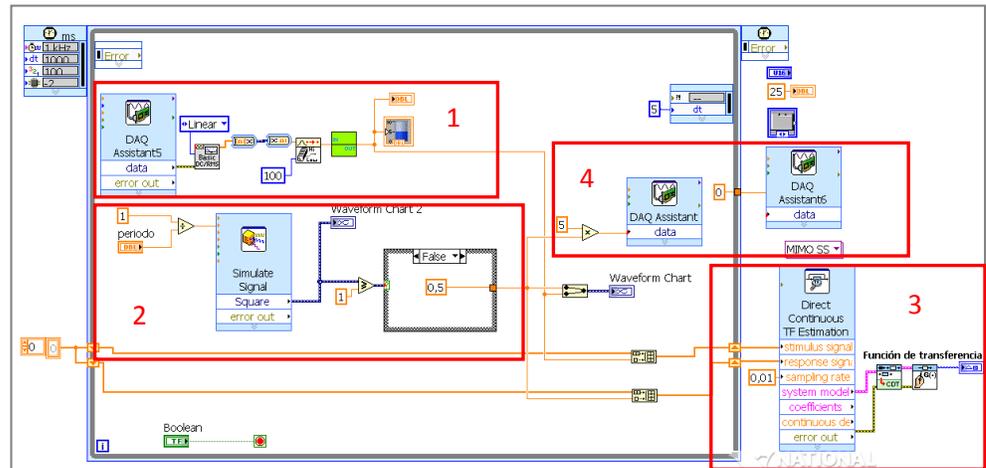
El siguiente bloque es el encargado de acondicionar el modelo para luego ser mostrado a través de un indicador.



#### 4.4.1 Selección del modelo

Para la selección del modelo se realizó la prueba de aplicar una señal estímulo a la planta y luego observar su respuesta para ello se hizo uso del siguiente Vi, formado por varias etapas como:

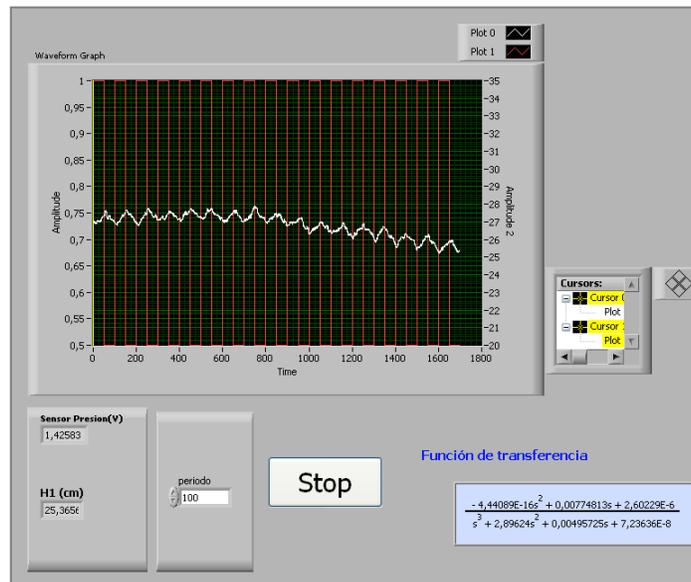
- 1.- Adquisición y Acondicionamiento de la señal.
- 2.- Generación de la señal estímulo.
- 3.- Generación de la función de transferencia.
- 4.- Generación de la señal de control.



**Figura 4.10** Vi usado en la Identificación de la planta.

#### 4.4.2 Simulación del modelo

A continuación tenemos los resultados obtenidos luego de realizar los respectivos ensayos, es decir aplicar una señal al sistema y obtener la respuesta del mismo.



**Figura 4.11** Resultados obtenidos en la identificación de la planta.

#### 4.5 Modelo seleccionado para la planta

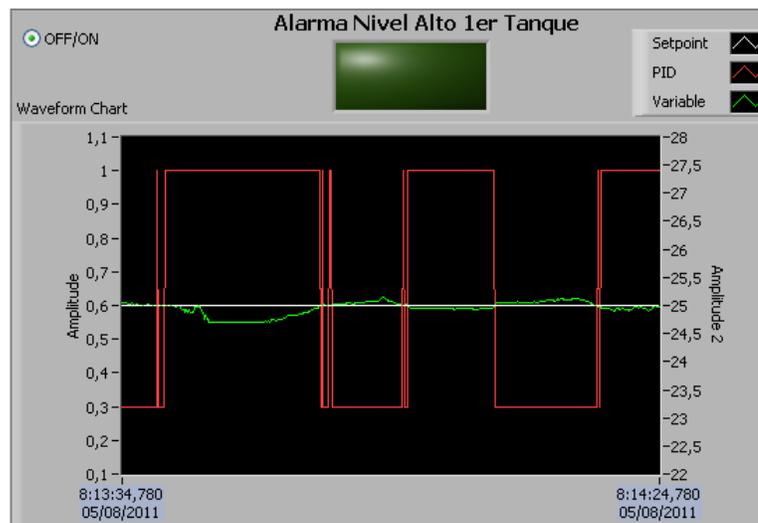
Después de realizar la prueba de aplicar la señal de estímulo a la planta y obtener una señal de respuesta el Vi genera el siguiente modelo o Función de transferencia.

**Función de transferencia**

$$\frac{-4,44089E-16s^2 + 0,00774813s + 2,60229E-6}{s^3 + 2,89624s^2 + 0,00495725s + 7,23636E-8}$$

**Figura 4.12** Función de Transferencia de la planta con Labview.

A continuación las tenemos señales de: Set Point, salida del controlador PID y variable del proceso.



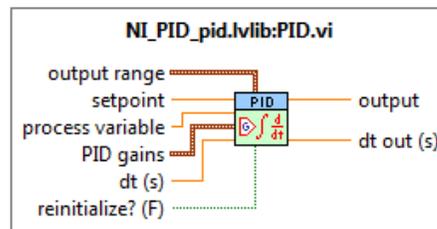
**Figura 4.13** Señales obtenidas en la Identificación del sistema.

## CAPÍTULO 5

### 5. DISEÑO DE CONTROL Y SIMULACIÓN

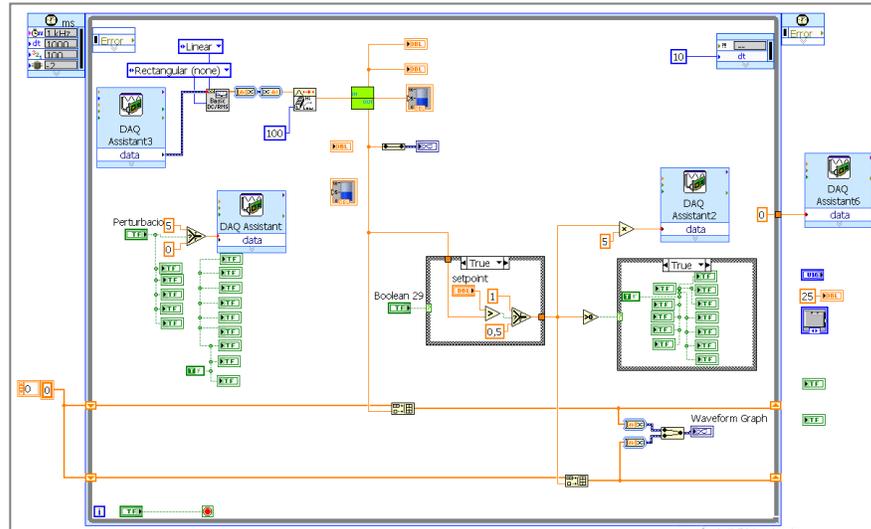
#### 5.1 Control PID utilizado desde Labview

El siguiente Vi es un controlador PID, el cual recibe como entrada principal la señal o variable de control, en este caso es la altura del sistema, además recibe las ganancias del sistema: proporcional, integral y derivativa. Genera como salida una señal que varía entre 0 y 1, esta señal es la que nos sirve para enviarla al actuador respectivo que sería en este caso el voltaje de control que recibe el circuito de generación de pulsos PWM.



#### 5.2 Sintonización de Parámetros del Controlador

Mediante el siguiente Vi, realizamos la etapa correspondiente a la sintonización de la planta y de esta forma obtenemos las ganancias: proporcional, integral y derivativa de nuestra planta.

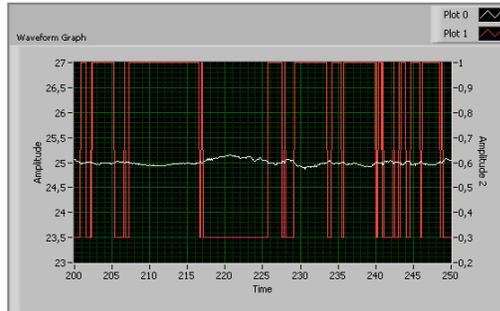


**Figura 5.1** Vi utilizado para Sintonizar la Planta.

Para determinar las ganancias se hace uso del método del relé de Astrom-Hagglung, del cual se habló en detalle en el capítulo 1, sección 1.3.8, es decir hacemos uso de la tabla 1.

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
<b>P</b>	0.8.Kpo	$\infty$	0
<b>PI</b>	0.45.Kpo	$\frac{1}{1.2}.To$	0
<b>PID</b>	0.6.Kpo	0.5.To	0.125.To

Al ejecutar este programa obtenemos las siguientes señales:



**Figura 5.2** Señales obtenidas en la Sintonización de la planta.

De esta grafica obtenemos los valores:  $K_p$  y  $T_o$ , los cuales nos sirven para calcular las respectivas ganancias para los diferentes controles.

Los valores obtenidos fueron:  $K_p=12$  y  $T_o= 0.02$  . Con estos datos tenemos los siguientes tipos de control:

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	9.6	$\infty$	0
<b>PI</b>	5.4	0.016	0
<b>PID</b>	7.2	0.01	0.0025

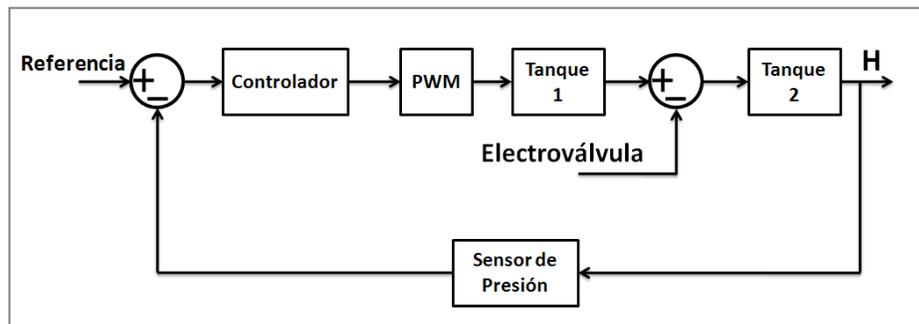
**Tabla 2** Ganancias obtenidas para cada tipo de controlador.

### 5.3 Criterios de Selección del Controlador

Para seleccionar el tipo de controlador tenemos que considerar la respuesta de la planta, es decir que en este caso necesitamos mantener un nivel constante por lo que optamos elegir el controlador PID, con esto tenemos las siguientes ganancias:  $K_p=7.2$ ,  $K_i=0.01$  y  $K_d=0.00225$ .

### 5.4 Implementación del Controlador

Para la implementación del controlador se considera el esquema de la figura 5.3, el cual está formado por: la señal de Referencia, el Controlador, circuito PWM, Tanque 1, la perturbación de la Electroválvula, Tanque 2, Sensor de presión.

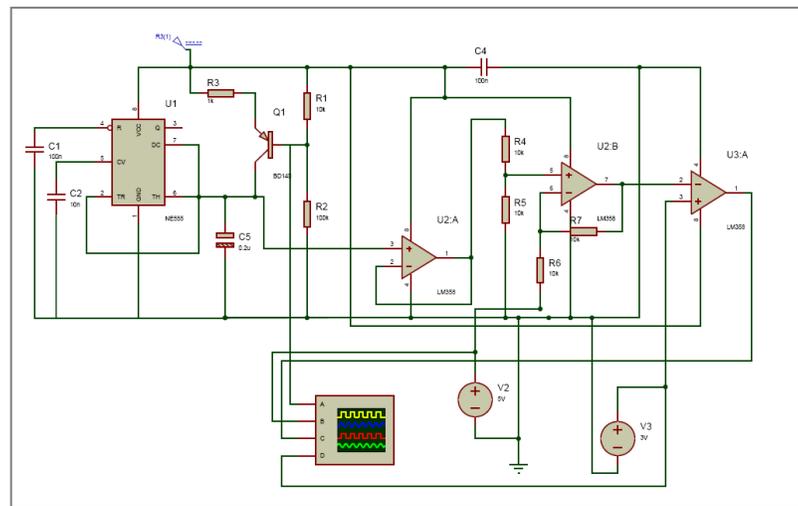


**Figura 5.3** Circuito en lazo cerrado del control de nivel de la planta.

## 5.5 Diseño del Generador PWM

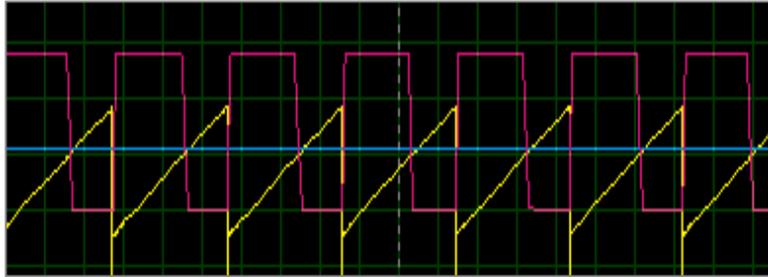
El circuito que empleamos para generar el PWM, está formado por un integrado LM555, un transistor BD 141, amplificadores operacionales LM 358, capacitores, resistencias.

En el siguiente esquemático se muestra el cableado del circuito que genera la señal PWM, y esta señal es enviada al Terminal de compuerta de los Mosfet IRG 131, del circuito de fuerza de las bombas.



**Figura 5.4** Circuito de control PWM.

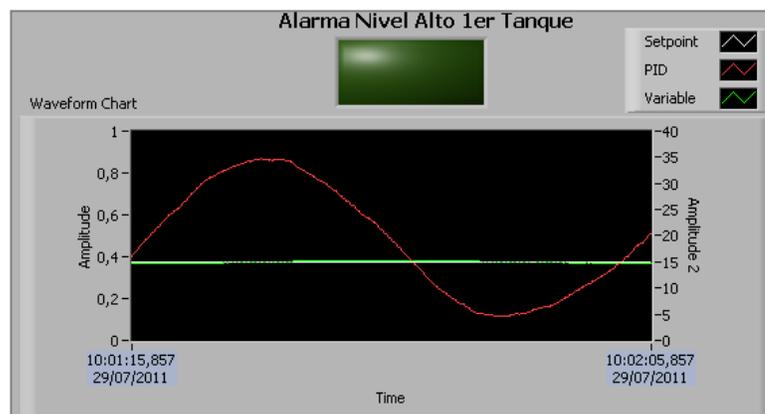
En el siguiente gráfico observamos las señales obtenidas del circuito de control PWM, tenemos la señal diente de sierra, la señal de referencia y los pulsos generados que habilitan a los mosfets.



**Figura 5.5** Señales Simuladas obtenidas del circuito de control PWM.

### 5.6 Simulación de la Planta con Controlador

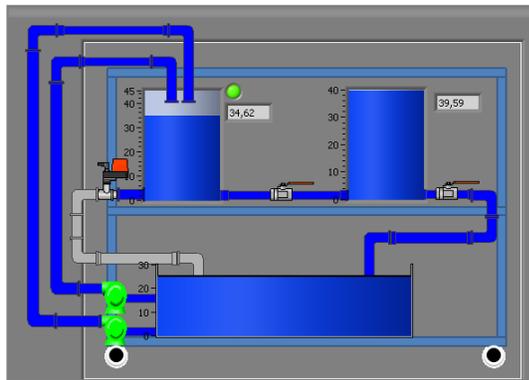
A continuación se muestra la señal de salida del controlador, que es la de color rojo, la señal en verde es la variable del proceso o sea el nivel y la blanca es el Set point o señal de referencia.



**Figura 5.6** Señales obtenidas del controlador y respuesta del sistema.

## 5.7 Scada de la planta

En esta parte se puede visualizar el llenado de los tanques 1 y 2, también se tiene un display que muestra el valor instantáneo de altura de cada tanque. Además podemos visualizar el estado de las bombas que puede ser en funcionamiento o no.

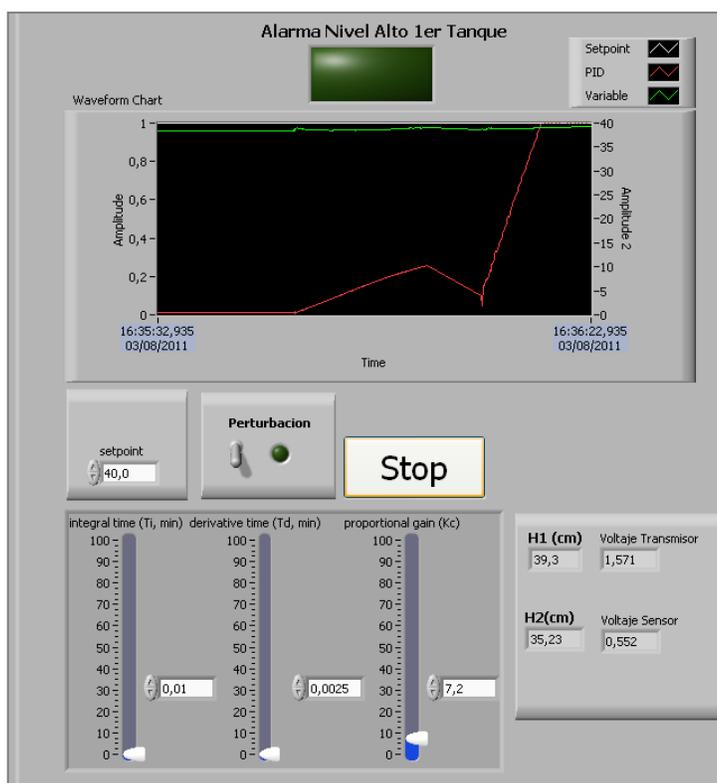


**Figura 5.7** Scada de la planta de nivel.

## 5.8 Manejo de la Planta

Para el control de un tanque y la regulación del mismo es un ejemplo ilustrativo de la importancia que existe entre la unión de dos ramas en este proyecto como son la instrumentación y el control automático, que con la ayuda del software que se está manejando en este caso labview que es una fuerte herramienta en el ámbito de diseño, construcción y valoración de sistemas de control.

En este capítulo se hará un estudio del correcto manejo de la planta de control de nivel o módulo de prácticas de instrumentación industrial, para lo cual se necesita tener claro ciertos conceptos básicos acerca de la Instrumentación, pero básicamente los que tienen relación con las características intrínsecas que presentan los protagonistas de todo lazo de control como son el sensor o transmisor y el sistema actuador.



**Figura 5.8** Señales de respuesta del sistema, con ganancias ajustadas.

## **5.9 Características Dinámicas y Estáticas del Transmisor de Presión.**

Para el estudio de la automatización de un proceso interesa el conocimiento de las relaciones existentes entre las variables de entrada y salida (variable manipulada y variable controlada) cuando no hay variaciones en el tiempo esto es, en condiciones de equilibrio. Las relaciones entre las variables, en condiciones de equilibrio son las características estáticas.

Un transmisor capta la variable del proceso a partir del elemento primario y la transmite a distancia. La señal transmitida puede ser neumática o eléctrica. En el caso del desarrollo de este proyecto, el transmisor que aquí utilizamos capta una señal de presión en unidades de PSI y la transforma en una señal de corriente de 4 a 20mA proporcional a las variaciones de presión ya mencionadas

Todo instrumento de medición está sujeto a características que definen su comportamiento tanto dinámico como estático, las cuales se convierten en criterios de selección a la hora de la compra o diseño de sistemas de control

### **5.9.1 Características Estáticas**

Son las características propias de toda medición, y por ende del instrumento destinado a realizarla. Entre ellas podemos anotar las siguientes:

- a. Campo de medida (rango).
- b. Alcance (Span).
- c. Error.
- d. Exactitud, Precisión y "Bias".
- e. Sensibilidad estática o ganancia.
- f. Repetitividad.
- g. Linealidad.
- h. Histéresis.
- i. Zona muerta.
- j. Deriva.

#### **a. Campo de medida**

No es nada más que el conjunto de valores de la variable medida comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento.

Viene expresada en función de los valores extremos. El transmisor de presión WINTERS posee un rango de trabajo de 0 – 5 PSI.

### **b. Alcance (Span)**

Es la diferencia algebraica entre el valor superior y el inferior del campo de medida del instrumento. El alcance del transmisor de presión es de 5 PSI.

### **c. Error**

Se puede definir error como la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. A continuación definiremos algunos de los términos utilizados en el cálculo de errores:

$$E = V_M - V_R$$

Donde:

E = Error

VM = Valor Medido

VR = Valor Real

M = Media del conjunto de mediciones

Existen muchas formas de clasificar los errores ocurridos en una medición, pero hay que distinguir dos diferentes tipos de errores principales, ellos son:

### **Error Aleatorio**

Son aquellos que se producen en forma completamente fortuita, procedentes de fuentes en general desconocidas y por tanto no calculables directamente. Existe un error aleatorio por cada medida tomada.

$$E_A = E - M$$

### **Error Sistemático**

Son aquellos de los que se conoce la fuente que los producen y la forma en que se manifiestan. En general los errores sistemáticos pueden calcularse, y por ende evitarse o

compensarse. Existe un error sistemático por cada conjunto de medidas en un mismo valor real, realizadas todas bajo igual condiciones.

$$E_S = M - V_{REAL}$$

#### **d. Precisión**

Es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio. Por lo general suele expresarse en porcentaje del alcance, directamente en unidades de la variable medida, o en un porcentaje de la lectura efectuada.

El transmisor WINTERS PT5 posee una precisión especificada por el fabricante de +/- 0.25% FSO. Es decir; el máximo error encontrado en una medición será de 0.0125 PSI.

**e. Repetitividad**

Es la capacidad de reproducción de las posiciones del índice o la pluma del instrumento al medir repetidamente idénticos valores de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo de medida.

Generalmente se considera su valor máximo y se expresa en tanto por ciento (%) del alcance. Un valor típico es de  $\pm 0,1$  %. La repetitividad de nuestro Instrumento sensor es proporcionada por el certificado de calibración del mismo siendo este valor de 0.005 PSI; es decir el 0.1% FSO.

**f. Histéresis**

Es el valor máximo de diferencia que se observa en los valores indicados por el instrumento para un mismo valor cualquiera del campo de medida cuando la variable medida recorre toda la escala en sentido ascendente y descendente.

### **g. Exactitud**

Esta característica nos especifica el error con el cual se mide. La exactitud se relaciona con la "ausencia de error" en las mediciones. La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática. La exactitud puede expresarse en términos de los conceptos de precisión y "Bias". El Bias se refiere a la parte constante del error y se relaciona con el error sistemático.

La exactitud es el principal resultado de una calibración, ya que expresa en si el estado del instrumento y su capacidad de trabajo dependiente de su uso o del proceso en el cual se utilice.

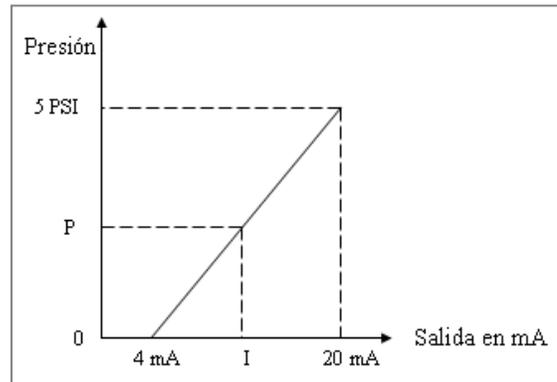
La exactitud del transmisor es de 0.0326 PSI, pero hay que tener en cuenta que esta exactitud se ve afectada inmensamente por el error sistemático ya analizado; es decir, esta exactitud mejorara al momento en que se realice el ajuste de cero recomendado.

### **5.9.2 Características dinámicas**

El comportamiento dinámico de un instrumento de medida puede considerarse como un ejemplo específico del comportamiento dinámico de los sistemas.

El modelo matemático general de los sistemas dinámicos más empleado es la ecuación diferencial lineal ordinaria con coeficientes constantes. Es frecuente caracterizar el comportamiento dinámico del instrumento empleando el modelo en forma de función de transferencia.

En el caso del el transmisor de presión WINTERS es perfectamente representado por una función de transferencia de orden cero ya que la salida sigue perfectamente las variaciones de entrada, es decir, el instrumento presenta una linealidad a lo largo de toda su escala.



**Figura 5.9** Característica del Transmisor de Presión.

Del gráfico de la figura 5.9 tenemos que:

$$\frac{I - 4}{20 - 4} = \frac{P - 0}{5 - 0}$$

$$P = \frac{5}{16}(I - 4)$$

## **CONCLUSIONES**

- 1) El haber implementado este prototipo de planta de nivel configuración vasos comunicantes ha sido de mucho aporte para nuestro aprendizaje y formación profesional, ya que hemos integrado muchos conocimientos de diferentes áreas como son adquisición de datos, control, instrumentación, electrónica y maquinas eléctricas.
- 2) En la parte de adquisición de señales entendimos que la mayoría de sensores son no lineales, así que buscamos una forma de linealizar estas señales y lo pudimos realizar tomando muestras experimentales y haciendo uso de una herramienta muy eficaz como Matlab.
- 3) Aprendimos la forma de elaborar un VI en labview para Sintonizar la planta y de esta forma poder obtener las ganancias para el controlador PID, también a Identificar la planta y obtener el modelo matemático o función de transferencia de este sistema.

- 4) Las señales de respuesta que se obtuvieron fueron aceptables, ya que se ajustaron las ganancias del controlador PID de forma que el nivel se aproxime al Set point de la forma más rápida y estable.
  
- 5) Cabe recalcar que el sistema fue desarrollado bajo un punto de operación óptimo (25cm) y el control va a estar operando alrededor de ese punto. Cualquier cambio que se realice fuera de este punto de operación el control no va a reaccionar como es debido. La válvula de salida debe estar con una apertura máxima de un 20% para que este disturbio no afecte al control ya que el flujo de salida es menor que el flujo de entrada.

## **RECOMENDACIONES**

- 1) Cuando se diseña un circuito electrónico es recomendable probarlo varias veces en protoboard antes de proceder a construir la placa y además tenemos que saber elegir los componentes necesarios para implementarlo.
- 2) En la parte de adquisición de señales es muy importante acondicionar las señales antes de cablear estas señales a la tarjeta de adquisición de datos, además se debe tener un aislamiento entre las etapas de control y fuerza con respecto a las fuentes de alimentación de dichos circuitos.
- 3) También se recomienda realizar pruebas experimentales del sistema, tomar mediciones. Como por ejemplo en el caso de los sensores, esto es para proceder a la calibración de los mismos y así poder obtener lecturas correctas de variables a medir.

4) Es recomendable para futuro en este proyecto colocar una bomba de mayor potencia, debido a que actualmente se tienen dos bombas con capacidades distintas y de potencia muy baja para poder compensar el flujo de entrada. Haciendo ese cambio la respuesta del sistema va a mejorar porque el proceso será más rápido.

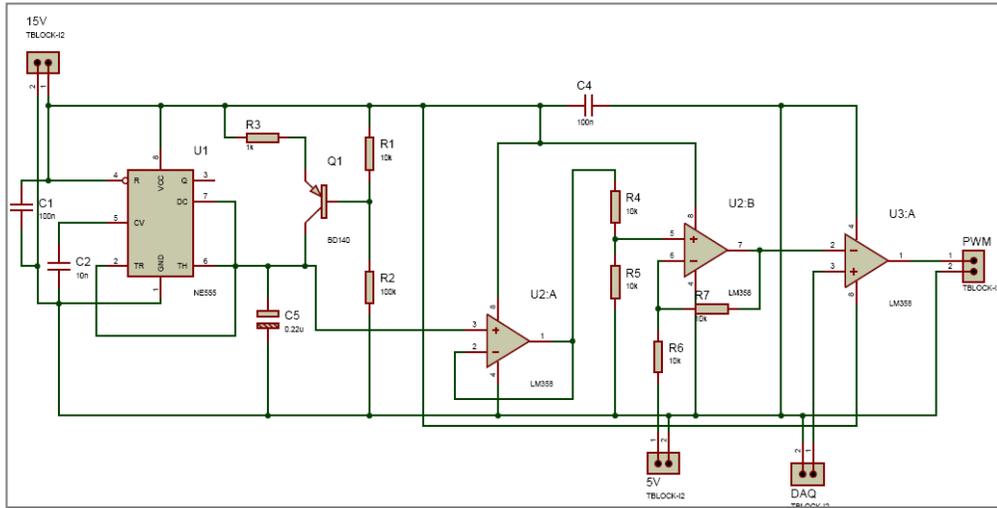
## **ANEXOS**

### **Anexo A**

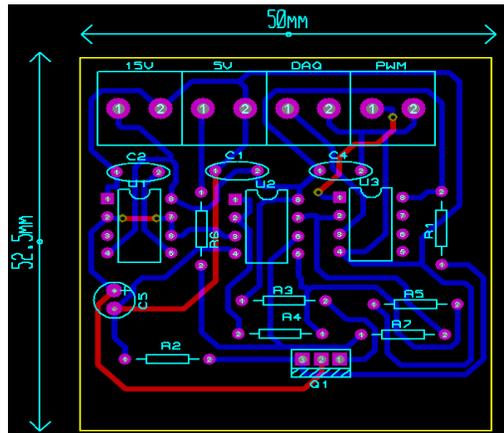
#### **Esquemáticos y Circuitos Impresos de los Circuitos de control, acondicionamiento y fuerza**

En la figura a continuación tenemos el diagrama esquemático del circuito de control PWM. Este circuito consta de las siguientes etapas:

- 1.- Generación de señal diente de sierra de 10KHz. Aquí se usa un integrado 555, un transistor PNP BD146, un opamp LM358 configurado como seguidor de Voltaje.
- 2.- Etapa de comparación de estabilización de la señal. Se usa opamp LM358, configuración Diferencial, para quitar la componte DC.
- 3.- Etapa de comparación, se usa un opamp LM358, aquí se compara la señal diente de sierra con la señal de control y se genera los pulsos PWM.



*Esquemático del circuito de generación PWM.*

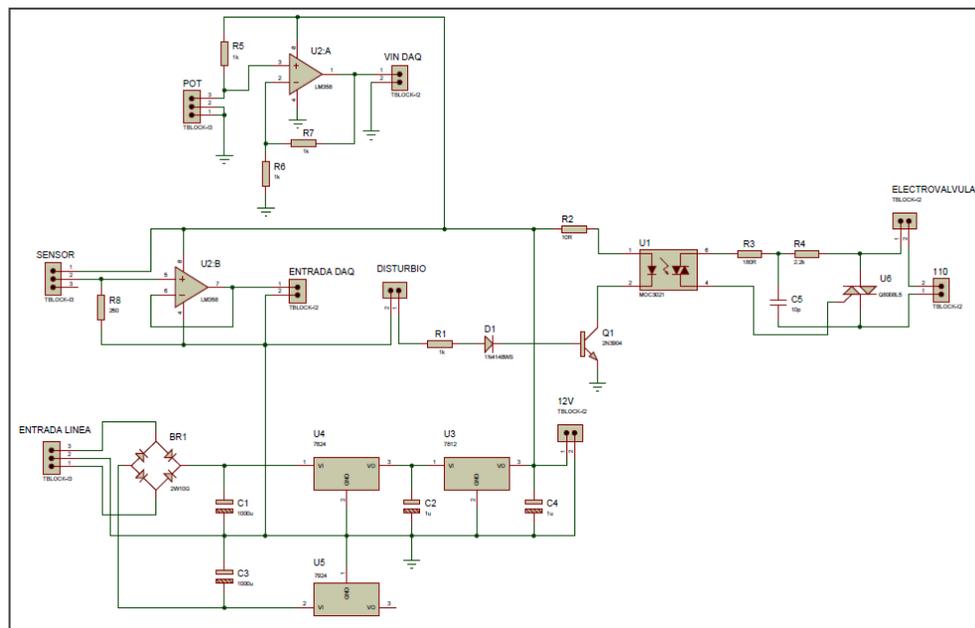


*Circuito Impreso del circuito de generación PWM.*

Los siguientes gráficos corresponden a los circuitos usados en el acondicionamiento de señales de los sensores, la salida de habilitación para la electroválvula y la Fuente de alimentación de 12 Vdc.

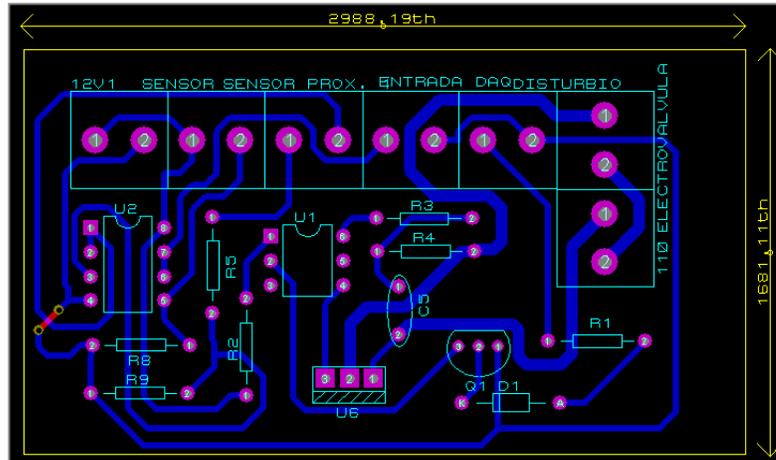
La etapa de acondicionamiento se realiza por medio del amplificador operacional LM358.

La electroválvula funciona con 120 Vac, debido a ello se hace uso del opto triac MOC3021 para la etapa de control, y en la etapa de fuerza se usa el TRIAC BT136.

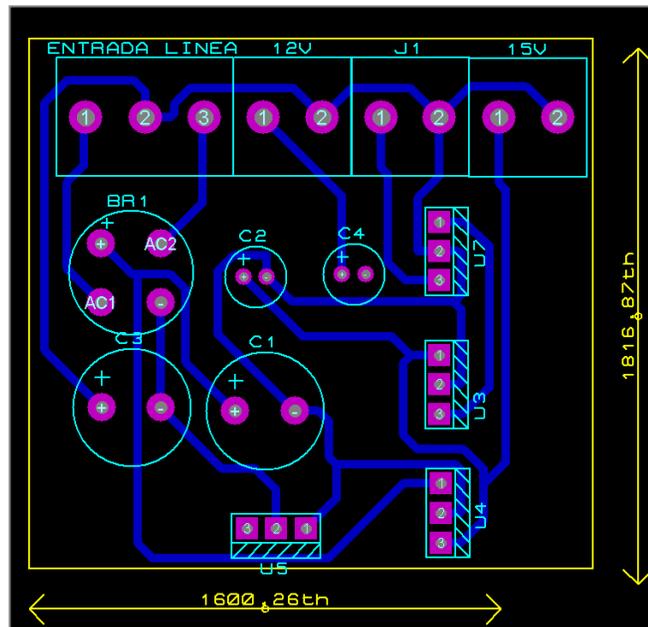


*Diagrama esquemático de las señales acondicionadas y Fuente de alimentación de 12 V.*

Luego tenemos los respectivos circuitos Impresos de las etapas acondicionamiento, fuerza de alimentación y Fuerza de la electroválvula.

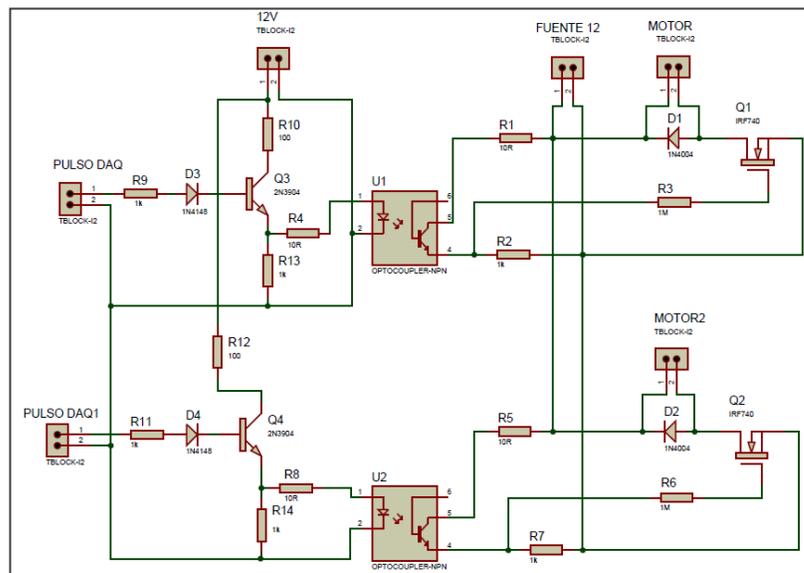


*Circuito impreso de señales de entrada acondicionadas.*



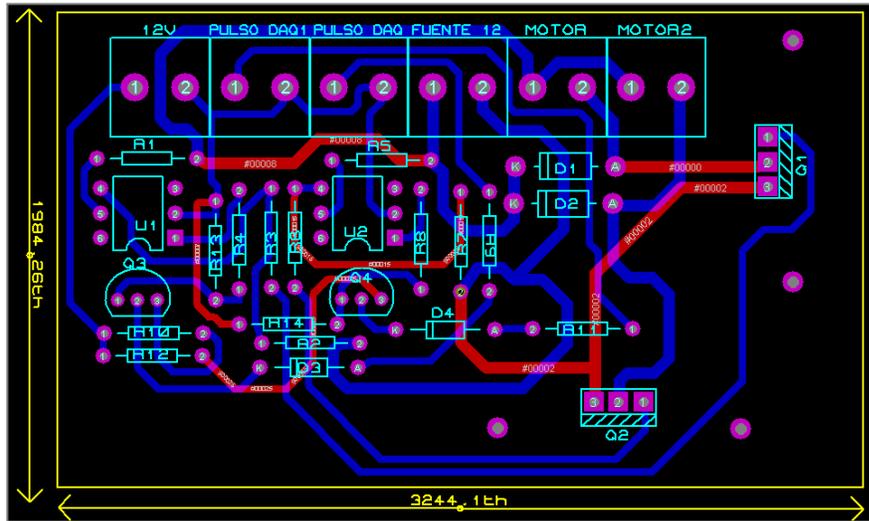
*Circuito impreso de la fuente.*

A continuación tenemos la parte de fuerza y control de las bombas DC, estos circuitos están formados por una etapa de aislamiento a través de él opto acoplador 4N25. En la etapa de fuerza se tiene a los mosfets IRF740, los cuales operen cuando reciben señal de habilitación en sus terminales de compuerta.



*Esquemático del circuito de Control y Fuerza.*

En la siguiente grafica se tiene el circuito impreso de la etapa de control y fuerza, la cual consta de dos caras superior e inferior.

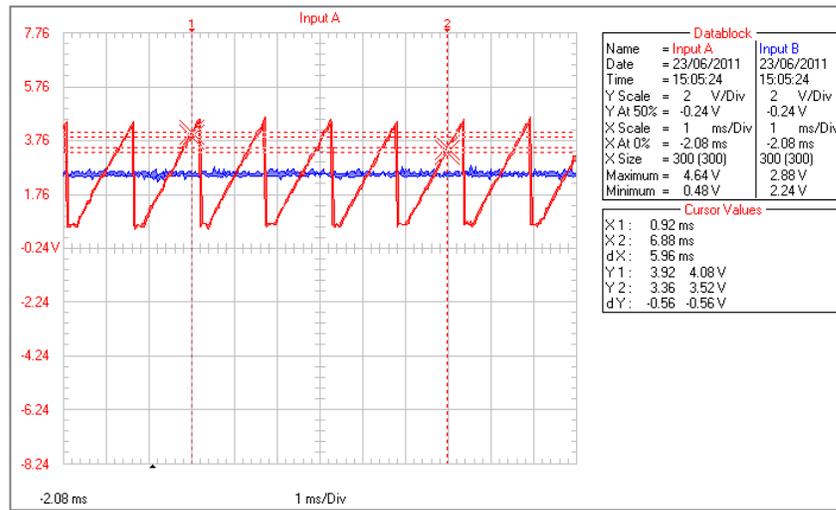


*Circuito impreso de las señales de Control y Fuerza.*

## Anexo B

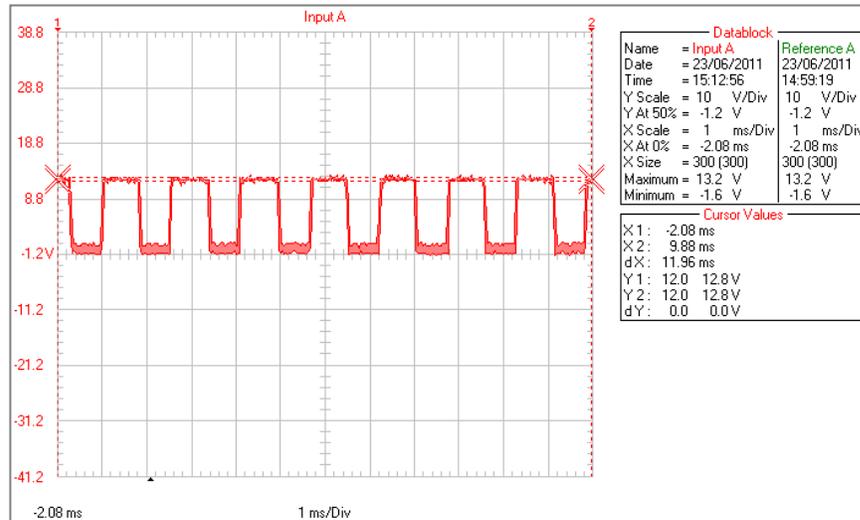
### Medición de las señales Diente de sierra y PWM, del circuito de control

A continuación tenemos una grafica obtenida del circuito electrónico que genera la señal PWM, luego dicha señal se envía a las compuertas de los mosfets IRF740



*Señal Triangular y de Control.*

En el grafico a continuación tenemos los pulsos de habilitación a los mosfets.



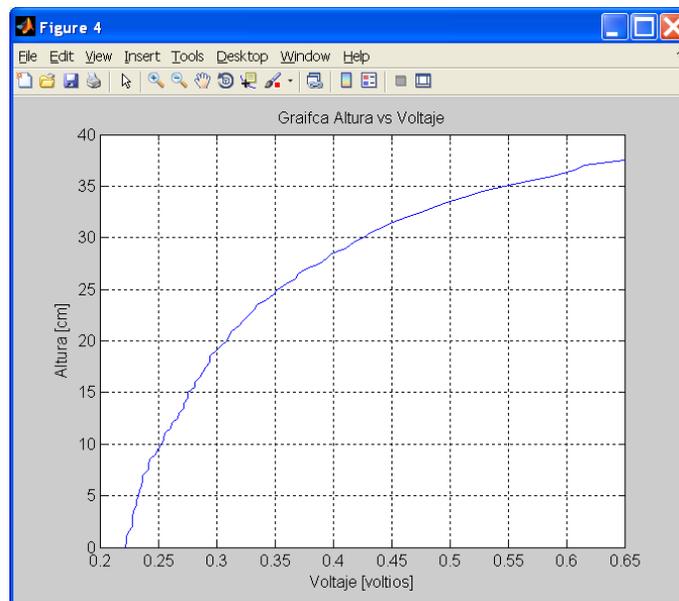
*Pulsos de habilitación.*

## Anexo C

### Linealización de la señal de voltaje del Sensor de Proximidad

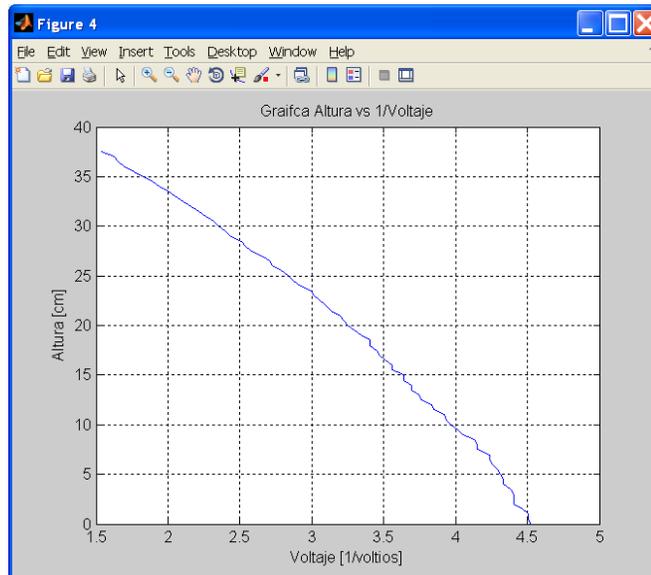
Para medir el nivel de altura del tanque 1 usamos el Sensor de Proximidad GP2Y0A21YK0F, debido a que la relación de Altura y voltaje de salida de este sensor no es lineal, fue necesario linealizar su variable de salida es decir el voltaje, se lo procede de una manera similar como se hizo con el Transductor de Presión.

En la siguiente grafica se observa la relación que existe entre la Altura y el voltaje de salida del Sensor.



*Altura vs Voltaje.*

A continuación tenemos la grafica: Altura medida relacionada con el inverso del Voltaje.



*Altura vs 1/Voltaje.*

Luego de se procede a linealizar las graficas anteriores, para esto hacemos uso de MATLAB y para el primer caso tenemos lo siguiente:

$$d = \text{polyfit}(a,b,4)$$

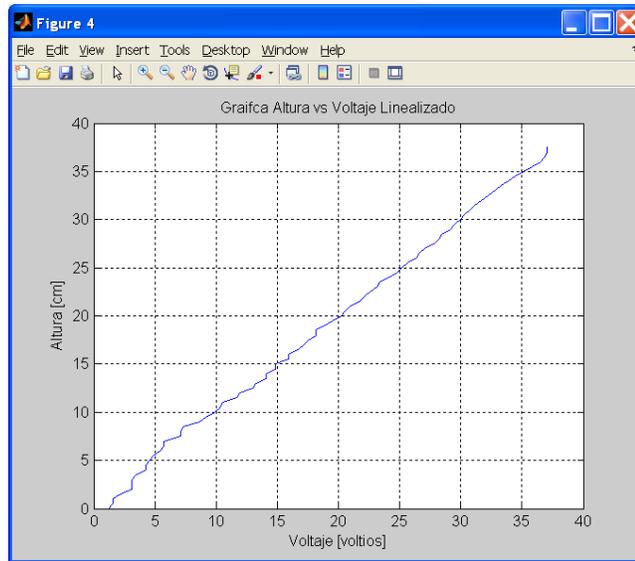
Como resultado tenemos los coeficientes del polinomio de cuarto orden:

$$d = 1.0e+003 * (-3.1582 \quad 6.2670 \quad -4.6946 \quad 1.6149 \quad -0.1865)$$

Finalmente tenemos la siguiente función que da como resultado el voltaje linealizado:

$$A = -3158.2 \cdot (V.^4) + 6267 \cdot (V.^3) - 4694.6 \cdot (V.^2) + 1614.9 \cdot (V.^1) - 186.5$$

Se obtiene la siguiente grafica:



*Altura vs Voltaje linealizado.*

De igual manera procedemos a linealizar la segunda grafica, es decir Altura vs 1/Voltaje. Para ello tenemos lo siguiente:

$$e = \text{polyfit}(c, b, 4)$$

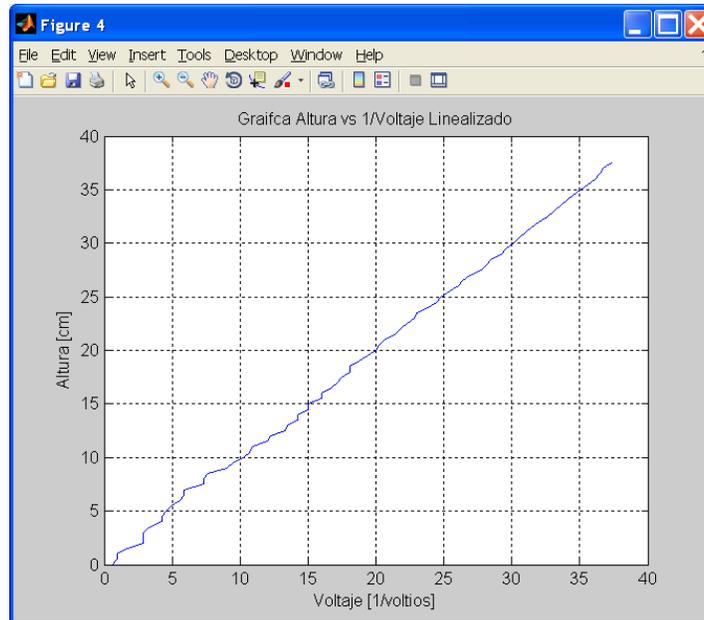
Obtenemos los coeficientes del polinomio de cuarto orden:

$$e = (-0.2465 \quad 2.7373 \quad -12.3876 \quad 15.3566 \quad 34.4383)$$

Luego se genera el siguiente polinomio:

$$A = -0.2465 \cdot (V.^4) + 2.7373 \cdot (V.^3) - 2.3876 \cdot (V.^2) + 15.3566 \cdot (V.^1) + 34.4383$$

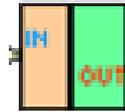
Y obtenemos la siguiente grafica:



*Altura vs 1/Voltaje linealizado.*

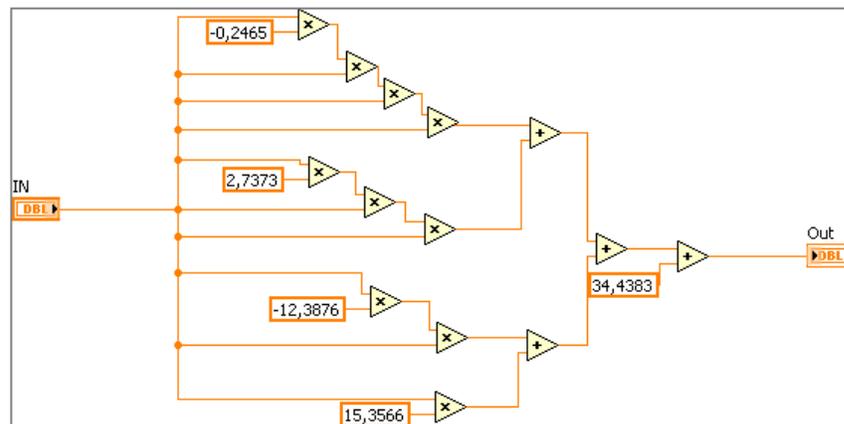
Finalmente elegimos este último resultado para crear el respectivo Vi que nos permitirá leer una altura proporcional al inverso del voltaje generado por el sensor de Proximidad.

Con estos datos generamos el Sub Vi que permite entregar una Altura proporcional al inverso de voltaje del Sensor de proximidad.



*Sub Vi genera una Altura Proporcional al inverso del voltaje.*

Internamente dicho Sub Vi se constituye por el polinomio con el cual se linealiza el voltaje del sensor de proximidad.



*Constantes del polinomio.*

## **BIBLIOGRAFÍA**

[1] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio ,Principles and Practice of AutomaticProcess Control, John Wiley& Son, Inc (Traducido por Editorial Limus"), 1985

[2] R.C. Dorf y R.H.Bishop, Modern Control System, Prentice Hall 11va Ed, Fecha de Publicación Julio 2007.

[3] Ing. Juan Gilberto Mateos Suárez, MEDICIÓN DE NIVEL,  
[http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/teoria/nivel/nivel1](http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/teoria/nivel/nivel1.htm)  
.htm, fecha de consulta julio del 2011.