

REDISEÑO DE ESTACIÓN DIDÁCTICA PARA CONTROL DE CAUDAL Y NIVEL

**Andrés Felipe Gómez Martínez
Santiago Pulgarin Agudelo
Edison Toro Piraquive**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERIA MECATRONICA
PEREIRA
2015**

REDISEÑO DE ESTACIÓN DIDÁCTICA PARA CONTROL DE CAUDAL Y NIVEL

**Andrés Felipe Gómez Martínez
Santiago Pulgarin Agudelo
Edison Toro Piraquive**

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico

Director del proyecto
MSc. Hernán Alberto Quintero Vallejo

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERIA MECATRONICA
PEREIRA
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, noviembre 18 de 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que nos brindaron un apoyo incondicional y nos motivaron siempre a sacar el proyecto adelante a pesar de los tropiezos que se presentaron durante el desarrollo, a nuestros padres y docentes que contribuyeron con sus conocimientos y experiencia, para guiarnos hacia un camino de crecimiento espiritual e intelectual.

De manera muy especial a nuestro docente Hernán Alberto Quintero Vallejo, ingeniero electrónico, que acepto amablemente acompañarnos en este proceso como director de proyecto, siendo un gran apoyo durante todo el trayecto de la investigación, por su paciencia, dedicación, su valiosa sabiduría y experiencia logramos culminar un trabajo impecable en la medida que establecimos nuestras metas.

Y nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una u otra forma nos apoyaron y aportaron su conocimiento para poder llevar a cabo este proyecto.

CONTENIDO

pág.

CONTENIDO	5
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACION	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 <i>Objetivo general</i>	14
2.2 <i>Objetivos especificos</i>	14
3. MARCO DE REFERENCIA	15
3.1 <i>Historia del control</i>	15
3.2 <i>Estado del arte</i>	18
3.2.1 Estación de Control de Procesos (PCS) Compact con pantalla táctil. (FESTO).....	18
3.2.2 IPA 1: Estación compacta (LUCAS NUELLE)	19
3.2.3 EduKit PA.....	20
3.3 <i>Marco teorico</i>	22
3.3.1 Fundamentos y naturaleza del sistema.....	22
3.3.2 Aspectos de control del sistema.....	23
3.4 <i>Marco conceptual</i>	25
3.4.1 Sistemas de control	25
3.4.2 Didáctica	27
3.4.3 Filtros.....	27
4. ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE ANALISIS	28
4.1 <i>Diferencia de potencial (voltaje)</i>	29
4.2 <i>Caudal</i>	29
4.3 <i>Nivel</i>	29
4.4 <i>Presion</i>	30
5. CAMBIOS Y MEJORAS DE FUNCIONALIDAD FISICA	31
5.1 <i>Retorno al tanque de almacenamiento</i>	31
5.2 <i>Valvula proporcional</i>	35
6. CAMBIOS Y MEJORAS ELECTRONICAS	39
6.1 <i>Valvula proporcional</i>	39
6.1.1 <i>Driver para control del servomotor</i>	40

6.2	<i>Sensor de nivel</i>	44
6.2.1	Sensor ultrasónico	46
6.3	<i>Sensor de presión</i>	52
6.3.1	Caracterización del sensor de presión	53
6.3.2	Normalización de la señal del sensor de presión.	55
6.3.3	Tarjeta para el sensor de presión	60
6.4	<i>Tarjeta para el control de la bomba</i>	62
6.4.1	Circuito de aislamiento de la bomba	62
6.4.2	Circuito de negación	62
6.4.3	Diseño de la tarjeta de control de la bomba	63
7.	ADECUACION DE SEÑALES Y PROGRAMACION DEL CONTROL PID	65
7.1	<i>Software de programación LabView</i>	65
7.2	<i>Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008</i>	67
7.3	<i>Adquisición de la señal del caudalímetro</i>	68
7.3.1	Convertor de número de pulsos a frecuencia	71
7.3.2	Caracterización del sensor de caudal	73
7.4	<i>Adquisición de las señales analógicas</i>	76
7.5	<i>Programación de la señal de control para la válvula</i>	79
7.6	<i>Programación de la señal de control para la bomba</i>	80
7.7	<i>Programación del Sistema de Control PID</i>	82
7.7.1	Programa PID para el control de nivel	83
7.7.2	Programa PID para el control de caudal	84
8.	DISEÑO DE LA PANTALLA HMI EN LABVIEW	85
8.1	<i>Diseño de la pantalla de menú</i>	86
8.2	<i>Diseño de la pantalla de control de nivel y caudal</i>	88
9.	DISEÑO DE LA CAJA DE CONTROL Y CABLEADO	90
9.1	<i>Diseño de la caja de control</i>	90
9.1.1	Adecuación de la caja prediseñada	90
9.1.2	Distribución y cableado interno	93
9.1.3	Inconvenientes y soluciones del cableado	95
9.2	<i>Cableado externo</i>	97
10.	PRESUPUESTO	100
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	102
	BIBLIOGRAFIA	103
	ANEXOS	104

ANEXO A: Código de programación del microcontrolador ATmega328 para el sensor de nivel.....	104
ANEXO B: Código de programación del microcontrolador ATmega328 para el servo drive.	109
ANEXO C: Hoja de datos sensor de presión.....	110
ANEXO D: Hoja de datos sensor de caudal.	115
ANEXO E: Hoja de datos de la bomba.....	117
ANEXO F: Hoja de datos de la tarjeta de adquisición de datos.	121

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Rendimiento de la bomba:	33
Tabla 2 Especificaciones del servo TowerPro SG-5010:.....	37
Tabla 3 Especificaciones del servo TowerPro MG995:	38
Tabla 4 Muestras tomadas del sensor:.....	45
Tabla 5 Distancia - PWM:	48
Tabla 6 Distancia – análoga (V):.....	49
Tabla 7 Datos sensor de presión 1:	54
Tabla 8 Datos sensor de presión 2:	54
Tabla 9 Datos normalización de señal:.....	59
Tabla 10 Requerimientos de la bomba:	62
Tabla 11 Tabla de características de la NI-USB-6008:.....	67
Tabla 12 Tabla de datos del sensor:.....	69
Tabla 13 Características del contador:	70
Tabla 14 Frecuencia vs caudal:	71
Tabla 15 Resultados a 10 Hz:.....	74
Tabla 16 Resultados a 15 Hz:.....	74
Tabla 17 Resultados a 20 Hz:.....	75
Tabla 18 Resultados a 28 Hz:.....	75
Tabla 19 Conexión salidas análogas:	76
Tabla 20 Características del sensor de presión MPX5100DP:.....	78
Tabla 21 Presupuesto:	100

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Molino de viento del siglo XIX totalmente Automatizado.....	15
Figura 2 Ilustración del reloj de agua de Ctesibius del siglo III a. C.	16
Figura 3 Croquis de la incubadora de Drebbel para empollar huevos de gallina. .	17
Figura 4 Croquis de la máquina de vapor de Watt.	17
Figura 5 Equipo compacto regulación de nivel, caudal, presión y temperatura. ...	18
Figura 6 Detector de caudal con señal de frecuencia.....	19
Figura 7 Sensor de ultrasonido.....	19
Figura 8 Estación compacta.....	20
Figura 9 EduKit PA (Básico).	21
Figura 10 Edukit PA (Advance sin tanque superior).	21
Figura 11 Estructura del sistema didáctico.	24
Figura 12 Estructura del sistema anterior.	31
Figura 13 Acumulacion de presion en el sistema.	32
Figura 14 Grafica altura vs caudal de la bomba.	32
Figura 15 Valvula de alivio.....	34
Figura 16 Regulacion a 9 psi.	34
Figura 17 Retorno al tanque.	35
Figura 18 Valvula proporcional.	35
Figura 19 Mecanismo de acople anterior.....	36
Figura 20 Mecanismo de acople actual.	36
Figura 21 Servo TowerPro MG995.	37
Figura 22 Válvula proporcional con mejoras.....	38
Figura 23 Válvula mecánica de bola.....	39
Figura 24 Funcionamiento servo.....	40
Figura 25 Ubicación PIC servo drive.....	40
Figura 26 Señal PWM control servo.	41
Figura 27 Circuito servo drive.	42
Figura 28 Circuito impreso servo drive.	42
Figura 29 Tarjeta terminada servo drive.	43
Figura 30 Caja para el servo drive.....	43
Figura 31 Válvula proporcional terminada con servo drive.....	44
Figura 32 Sensor de presión.....	44
Figura 33 Rango de presión del sensor MPX5100DP.	46
Figura 34 Sensor Ultrasónico HC – SR04.	47
Figura 35 Salida PWM del microcontrolador.....	48
Figura 36 Circuito conversión PWM a análoga.....	49
Figura 37 Circuito para sensor de nivel.	50
Figura 38 Circuito impreso sensor de nivel.....	50
Figura 39 Tarjeta terminada sensor de nivel.	51
Figura 40 Caja para el sensor de nivel.	51
Figura 41 Sensor de nivel terminado.	52
Figura 42 Ubicación del sensor de presión.....	53

Figura 43 Calibración del sensor de presión.	53
Figura 44 Linealidad del sensor de presión.	55
Figura 45 Voltaje sensor - Voltaje normalizado.	56
Figura 46 Circuito con amplificadores operacionales.	57
Figura 47 Circuito de normalización PROTEUS.	59
Figura 48 Circuito para sensor de presión.	60
Figura 49 Circuito impreso sensor de presión.	60
Figura 50 Tarjeta terminada sensor de presión.	61
Figura 51 Sensor de presión terminado.	61
Figura 52 Circuito de aislamiento de la bomba.	62
Figura 53 Circuito negadora de señal.	63
Figura 54 Circuito para control de la bomba.	63
Figura 55 Circuito impreso control de la bomba.	64
Figura 56 Tarjeta terminada control de la bomba.	64
Figura 57 Programa “Dibujado” en LabView.	67
Figura 58 Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008.	68
Figura 59 Principio de funcionamiento del caudalímetro.	69
Figura 60 Menú DAQmx.	72
Figura 61 Programa LabView – conversión a Hz.	72
Figura 62 Medición de frecuencia con osciloscopio.	73
Figura 63 Programa LabView – conversión Hz a caudal.	76
Figura 64 Características de las entradas análogas de la DAQ.	77
Figura 65 Adquisición de las señales análogas.	79
Figura 66 Características de las salidas análogas de la DAQ.	79
Figura 67 Programación de la salida análoga.	80
Figura 68 Características de las salidas digitales de la DAQ.	81
Figura 69 Programación de la salida digital.	82
Figura 70 Bloque PID.	82
Figura 71 Escalamiento de la señal de nivel.	83
Figura 72 Programación PID para control de nivel.	83
Figura 73 Escalamiento de la señal de caudal.	84
Figura 74 Programación PID para control de caudal.	84
Figura 75 Opciones del módulo DSC	85
Figura 76 Pantalla de menú.	86
Figura 77 Programa encargado de la pantalla de menú.	87
Figura 78 Submenú.	87
Figura 79 Pantalla principal.	88
Figura 80 Programa encargado de la pantalla principal y demás funciones	89
Figura 81 Caja electrica prediseñada de 30x30.	90
Figura 82 Croquis de los orificios.	91
Figura 83 Caja pintada.	91
Figura 85 Caja de control terminada.	92
Figura 86 Diagrama de cableado interno.	93
Figura 87 Distribucion de los elementos dentro de la caja.	94
Figura 88 Cableado dentro de la caja.	94

Figura 89 Fuente para alimentacion de sensores..... 95
Figura 90 Caja 20x20 para fuente de potencia..... 96
Figura 91 Distribucion de la caja de potencia. 96
Figura 92 Cables usados para conexiones..... 97
Figura 93 Pines usados para terminales de cableado..... 97
Figura 94 Cableado externo. 98
Figura 95 Estacion didactica terminada..... 99

INTRODUCCIÓN

La Universidad Tecnológica de Pereira, dentro del programa de Ingeniería Mecatrónica, cuenta con una estación didáctica para control de caudal y nivel, que fue diseñada por egresados del programa de Ingeniería Mecatrónica. Esta estación brinda un entorno físico de aprendizaje; permitiendo afianzar los conocimientos adquiridos durante los temas vistos en el transcurso de diversas asignaturas teórico/prácticas.

La estación cuenta con sensores y actuadores de muy buena calidad facilitando un control adecuado de nuestras variables. Estos sensores funcionan como los ojos de los estudiantes y los actuadores como los músculos que generan la acción. Los estudiantes se encargan de poner su conocimiento a prueba al garantizar que haya una buena comunicación entre sensores y actuadores con el fin de realizar un control óptimo de la variable.

El correcto funcionamiento de estos sistemas didácticos es de vital importancia para la buena fundamentación y preparación de ingenieros mecatrónicos en los ámbitos de instrumentación, visualización y control de procesos industriales por lo que se hace necesario que tengan altos índices de confiabilidad en las magnitudes entregadas.

La importancia de rediseñar la estación didáctica se debe a la posibilidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan que sea versátil la utilización de este dispositivo, y la adaptación de nuevos sensores que hoy en día son más asequibles.

Por lo anteriormente descrito es necesario garantizar el correcto funcionamiento de la estación didáctica para el control de caudal y nivel, la cual posee problemas de ruido electrónico debido al diseño, que influyen negativamente en las medidas entregadas al usuario afectando la interfaz hombre-máquina de este proceso.

1. JUSTIFICACION

Las prácticas de laboratorio deben ser tomadas como estrategias de aprendizaje significativo, en las que el alumno “aprende a pensar” resolviendo problemas reales. Esta afirmación rompe con el paradigma de la educación clásica centrada en el maestro y en métodos tradicionales de aprendizaje memorístico, y concientiza al alumno de su necesidad de aprender y de llegar más allá de las notas de clase, para que con la adecuada motivación y la colaboración del docente pueda lograr ser autónomo de su propio aprendizaje.

Es necesario que el programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira cuente con estaciones didácticas, para afianzar los conocimientos adquiridos durante los cursos de instrumentación y control, y además probar programas realizados por los estudiantes en un entorno más práctico y visual mediante el uso de software de gráfico.

Esta estación permitirá ampliar la visión del estudiante hacia los procesos de mediciones de variable a un nivel teórico/práctico, pudiendo realizar la comparación de lo práctico con lo teórico de una manera más sencilla.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Rediseñar la estación didáctica de control de caudal y nivel, para que esta pueda ser usada en los procesos de enseñanza de asignaturas.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

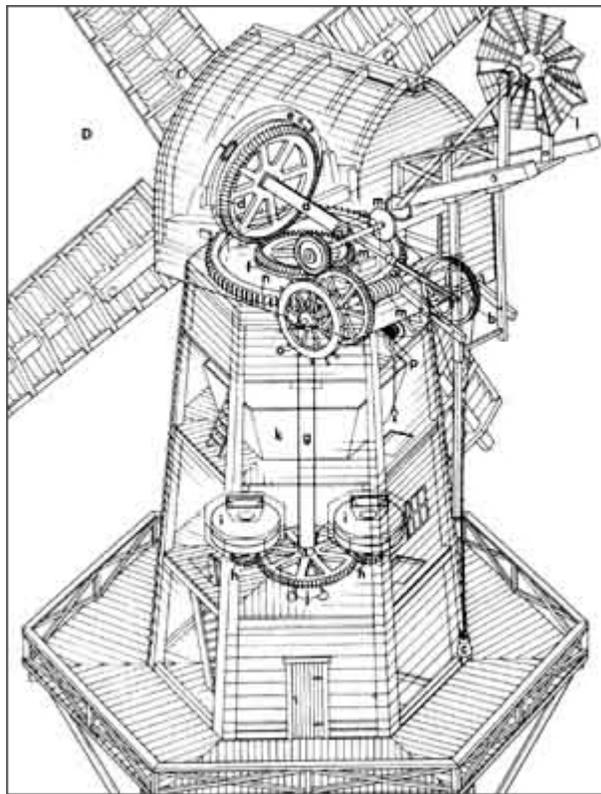
- Caracterizar los sensores de la estación didáctica para control de caudal y nivel.
- Diseñar el circuito electrónico que disminuya las perturbaciones del sistema.
- Reacondicionar los componentes necesarios de la parte física para mejorar la productividad del sistema.
- Realizar el interfaz de comunicación utilizando el software adecuado.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 HISTORIA DEL CONTROL

El control automático, particularmente la aplicación de lazo-cerrado, ha sido fundamental para el desarrollo de la automatización. Sus orígenes dan inicio en el control de nivel, relojes de agua y en la neumática e hidráulica empleada desde tiempos antiguos. Desde el siglo XII en adelante, fueron diseñados sistemas de control de temperatura, control mecánico de molinos de agua y viento y sistemas de regulación para motores a vapor.

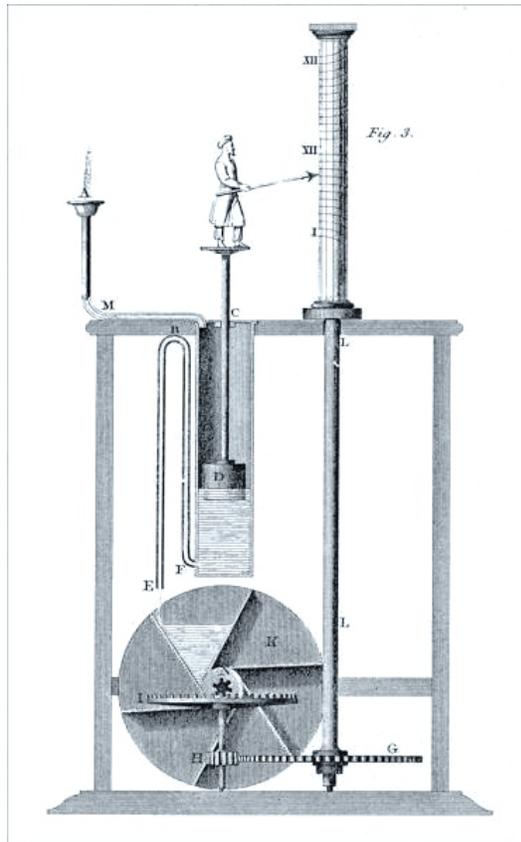
Figura 1 Molino de viento del siglo XIX totalmente Automatizado.



Fuente: http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/primeros_ejemplos_historicos_de_.htm

Uno de los primeros trabajos sobre control de mecanismos, desde la antigüedad, es el control de la razón de flujo para regular un reloj de agua, el cual se reduce al control de nivel del fluido, ya que un pequeño orificio produce un flujo constante cuando la presión es constante. El mecanismo inventado en la antigüedad para controlar el nivel de un líquido, y todavía existente hoy día, es la válvula flotante semejante a la del depósito de agua de un inodoro convencional. El flotador está hecho de tal manera que, cuando el nivel baja, el caudal hacia el depósito aumenta y cuando el nivel sube, el caudal disminuye y si es necesario se corta (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 1991).

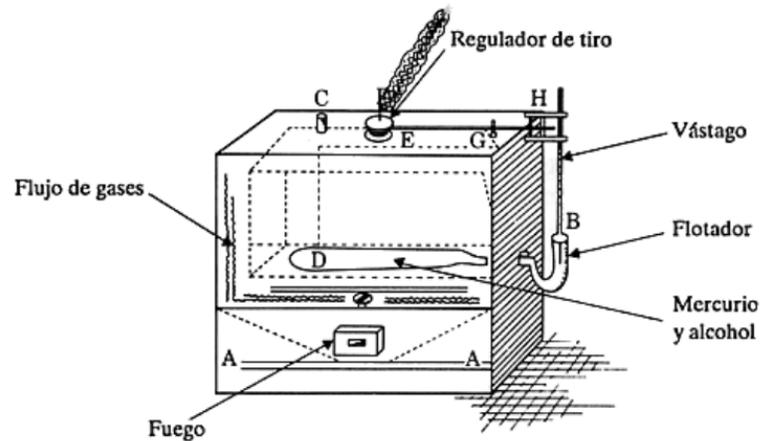
Figura 2 Ilustración del reloj de agua de Ctesibius del siglo III a. C.



Fuente: <http://theconversation.com/we-are-the-creators-of-artificial-life-both-now-and-through-the-ages-8958>

Un caso más moderno de retroalimentación es el control de temperatura de un horno para calentar una incubadora, sistema que fue diseñado por Drebbel hacia 1620. En la Figura 3 se muestra un croquis de este sistema. El horno consta de una caja que contiene el fuego, con un tubo en la parte superior provisto de un controlador de tiro. Dentro de la cámara de combustión está la incubadora de paredes dobles y el hueco que queda entre las paredes se llena con agua. El sensor de temperatura es un recipiente de vidrio lleno de alcohol y mercurio colocado en la cámara de agua entre paredes en torno a la incubadora.

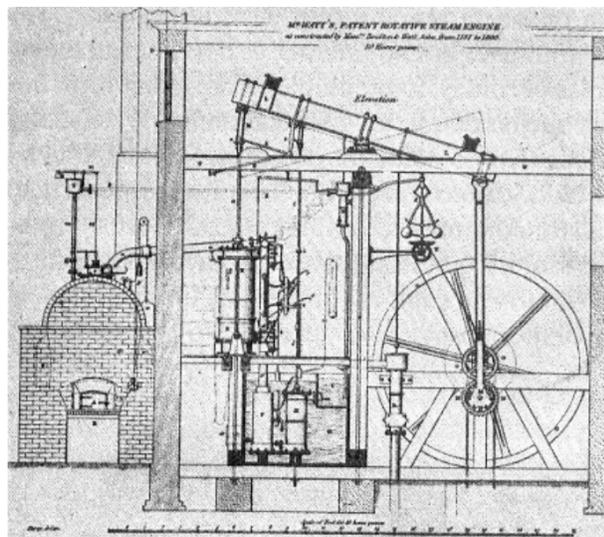
Figura 3 Croquis de la incubadora de Drebbel para empollar huevos de gallina.



Fuente: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/537/DocumentoFinal.pdf?sequence=1>

En la búsqueda de un medio para controlar la velocidad de rotación de un eje, problema famoso en las crónicas del control automático, como el deseo de controlar automáticamente la velocidad de la piedra de molienda de un molino de viento harinero, de varios métodos intentados, el más prometedor resultó ser el que usaba un péndulo cónico, o controlador de bola flotante. Para medir la velocidad del molino de viento, sus aspas se hacen girar con cuerdas y poleas, para mantener una velocidad fija. Pero fue su adaptación a la máquina de vapor en los laboratorios de James Watt, alrededor de 1788, la que hizo famoso al controlador de bola flotante. La Figura 4 muestra un dibujo del diseño de la firma Boulton y Watt de 1788.

Figura 4 Croquis de la máquina de vapor de Watt.



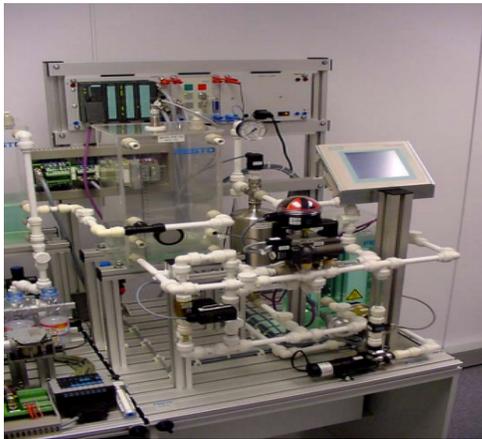
Fuente: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/537/DocumentoFinal.pdf?sequence=1>

3.2 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad hay un gran número de sistemas didácticos para el control de caudal y nivel, pero debido a que estos son en su mayoría importados al país desde empresas como FESTO y LUCAS-NÜLLE desde Alemania son equipos de un costo algo elevado. A continuación se mostraran algunos de estos sistemas.

3.2.1 Estación de Control de Procesos (PCS) Compact con pantalla táctil. (FESTO)¹

Figura 5 Equipo compacto regulación de nivel, caudal, presión y temperatura.



Fuente: FESTO.

Tramo de regulación del caudal:

La bomba transporta un líquido desde el recipiente a través de un sistema de tuberías. La velocidad del flujo se determina en calidad de valor real utilizando un detector de rotor optoelectrónico. Se trata de un tramo de regulación con compensación (tramo P). En él no se produce un retardo. En el circuito de regulación y la bomba (PT1) se obtiene un tramo apropiado para la regulación.

¹Equipo compacto con regulación de nivel, caudal, presión y temperatura (con pantalla táctil)
http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/carta_anexo.pdf

Figura 6 Detector de caudal con señal de frecuencia.



Fuente: FESTO.

Tramo de regulación de nivel:

La bomba transporta un líquido desde el recipiente hacia un depósito superior. El nivel de llenado del depósito se mide con un sensor de ultrasonido. El tramo de regulación puede ser tipo I o PT1.

Figura 7 Sensor de ultrasonido.



Fuente: FESTO.

3.2.2 IPA 1: Estación compacta (LUCAS NUELLE)²

Control profesional de presión, temperatura, volumen y caudal: la estación compacta, en la que se integran cuatro sistemas controlados, constituye la

²IPA 1: Estación compacta - http://www.lucas-nuelle.es/index.php/fuseaction/download/lrn_file/industrial_process_automation_es.pdf

solución óptima para procesos de producción típicos de las áreas más disímiles. La modularidad de la estructura permite la creación de numerosas configuraciones dentro del seguro entorno del laboratorio. En la siguiente imagen puede ver la estación compacta.

Figura 8 Estación compacta.



Fuente: http://www.lucas-nuelle.es/index.php/fuseaction/download/lrn_file/industrial_process_automation_es.pdf/

3.2.3 EduKit PA

Existen dos sistemas para medición, control y regulación los cuales son: el *EduKit PA Basic* ver (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el *Advance*, con el primero se realiza una introducción gradual en los temas de la medición manual, el control y la regulación tomando como ejemplo un sistema sencillo con regulaciones de llenado, de caudal y de presión. (FESTO)

Figura 9 EduKit PA (Básico).



Fuente: FESTO

En el *EduKit PA Advance* (ver imagen 10) se añaden los sensores de presión, de caudal y ultrasónicos y la placa de conexión E/S (entradas y salidas) para un control a su elección con la técnica de automatización apropiada. El llenado en el depósito inferior se controla mediante una electroválvula de 2/2 vías. Aquí también puede utilizarse una válvula industrial para procesos continuos.

Figura 10 Edukit PA (Advance sin tanque superior).



Fuente: FESTO

3.3 MARCO TEORICO

3.3.1 Fundamentos y naturaleza del sistema

Los procesos de control tienen una larga historia que comenzó con el deseo primordial de los seres humanos de dominar los materiales y las fuerzas de la naturaleza en su provecho.

Los primeros ejemplos de dispositivos de control incluyen los sistemas de regulación de relojes y los mecanismos para mantener los molinos de viento orientados en la dirección del viento.

Las plantas industriales modernas poseen sofisticados sistemas de control que son cruciales para su operación correcta.

La ingeniería de control ha tenido un enorme impacto en nuestra sociedad. De hecho, ninguno de los sistemas modernos (aviones, trenes de alta velocidad, reproductores de CD, entre otras.) podrían operar sin la ayuda de sofisticados sistemas de control.

Algunas de las principales áreas en las cuales se pueden aplicar soluciones de control son:

1. Procesos industriales
2. Transporte
3. Autos
4. Trenes
5. Barcos
6. Aviones
7. Naves espaciales
8. Generación de energía
9. Transmisión de energía
10. Mecatrónica
11. Instrumentación
12. Artefactos electrónicos
13. Economía
14. Medicina

Las principales ventajas de usar técnicas de control son:

1. Productos de mayor calidad
2. Minimización de desperdicios
3. Protección del medio ambiente
4. Mayor rendimiento de la capacidad instalada
5. Mayores márgenes de seguridad

La Ingeniería de Control está presente virtualmente en todos los sistemas modernos de ingeniería.

El control es una tecnología a menudo “invisible”, ya que el éxito mismo de su aplicación la vuelve indetectable.

El control es la clave tecnológica para lograr productos de mayor calidad, minimización de desperdicios, protección del medio ambiente, mayor rendimiento de la capacidad instalada, mayores márgenes de seguridad. El control es multidisciplinario (incluye sensores, actuadores, comunicaciones, cómputo, algoritmos, entre otros.) El diseño de control tiene como meta lograr un nivel de rendimiento deseado frente a perturbaciones e incertidumbre.

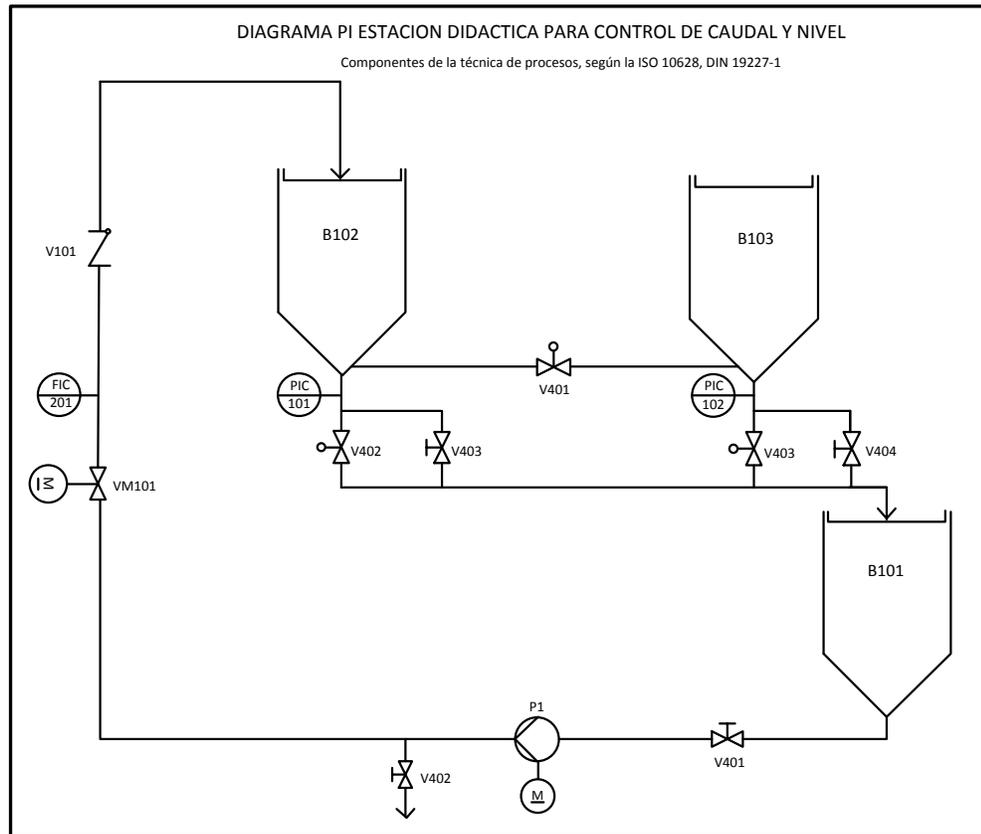
3.3.2 Aspectos de control del sistema

La estructura física de la planta es una parte intrínseca del problema de control. Antes de diseñar sensores, actuadores, o configuraciones de control, es importante conocer los objetivos de control.

Una vez ubicados los sensores para informar el *estado* de un proceso, sigue determinar la forma de actuar sobre el sistema para hacerlo ir del estado actual al estado deseado. Un problema de control industrial típicamente involucrará varios actuadores distintos. La interconexión de sensores y actuadores requieren el uso de sistemas de comunicación. Una planta típica va a tener muchas señales que deberán ser transmitidas a cortas y largas distancias.

Así, el diseño de sistemas de comunicación y sus protocolos asociados es un aspecto cada vez más importante de la ingeniería de control moderna. En los sistemas de control modernos la interconexión de sensores y actuadores se hace invariablemente a través de una computadora de algún tipo. Por lo tanto, los aspectos computacionales son necesariamente una parte del diseño general. (Ver figura 11).

Figura 11 Estructura del sistema didáctico.



Fuente: Jose A. Ocampo, & LUIS H. Pulgarin, E. (2013). Diseño y construcción de una estación didáctica para control de caudal y nivel. Tesis. Colombia.

Los sensores proveen los “ojos”, los actuadores los “músculos”; la teoría de control la destreza. Mejores sensores dan mayor visión, calidad en actuadores dan más músculos; mejor control da más destreza, al combinarse sensores y actuadores de forma más inteligente. Uno de los factores que hacen a la ciencia del control interesante es que todos los sistemas reales están afectados por ruido y perturbaciones externas.

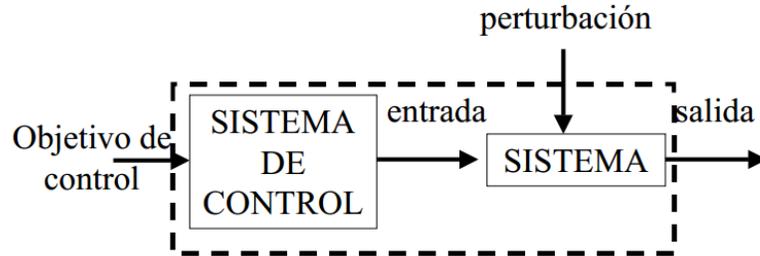
Estos factores pueden tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema. Para poder avanzar en ingeniería de control (como en muchas otras disciplinas) es importante saber justificar los gastos asociados. Esta justificación usualmente toma la forma de un análisis costo-beneficio. El problema central en control es encontrar una forma técnicamente realizable de actuar sobre un determinado proceso de manera que éste tenga un funcionamiento que se aproxime a cierto comportamiento deseado tanto como sea posible. Además, esta conducta aproximada deberá lograrse aun teniendo incertidumbres en el proceso, ante la presencia de perturbaciones externas, incontrolables, actuando sobre el mismo.

3.4 MARCO CONCEPTUAL

3.4.1 Sistemas de control

Es el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control.

Figura 11 Esquema de un sistema de control.



Fuente: http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf

Algunos de los conceptos de control necesarios para la elaboración del proyecto son los siguientes:

- **Acción de control proporcional³:** Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador y la señal de error e es:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad [1]$$

Donde se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable.

- **Acción de control integral⁴:** Para eliminar el error en régimen permanente es imprescindible añadir una actuación adicional CV_0 a la acción proporcional, de acuerdo con la ecuación:

$$CV = K_p * (SP - PV) + CV_0 \quad [2]$$

Su valor permanece invariable a lo largo del proceso de regulación y debe ser tal que anule el error.

El valor de CV_0 se puede obtener también mediante la integral del error, porque es una función que actúa mientras existe un error distinto de cero, de acuerdo con la ecuación:

³OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson Educación, 2003, p. 65.

⁴MANDADO, Enrique., ACEVEDO, Jorge M. y FERNÁNDEZ, Celso. Autómatas programables y sistemas de automatización. Galicia: Alfaomega, 2009, p. 385.

$$CV_0 = \frac{K_P}{T_i} * \int_0^i (SP - PV)dt \quad [3]$$

En la que T_i es la constante de tiempo de integración.

Con la acción integral se logra que un pequeño error positivo produzca siempre un incremento de la señal de control y un error negativo una disminución de la misma, aunque el error sea muy pequeño.

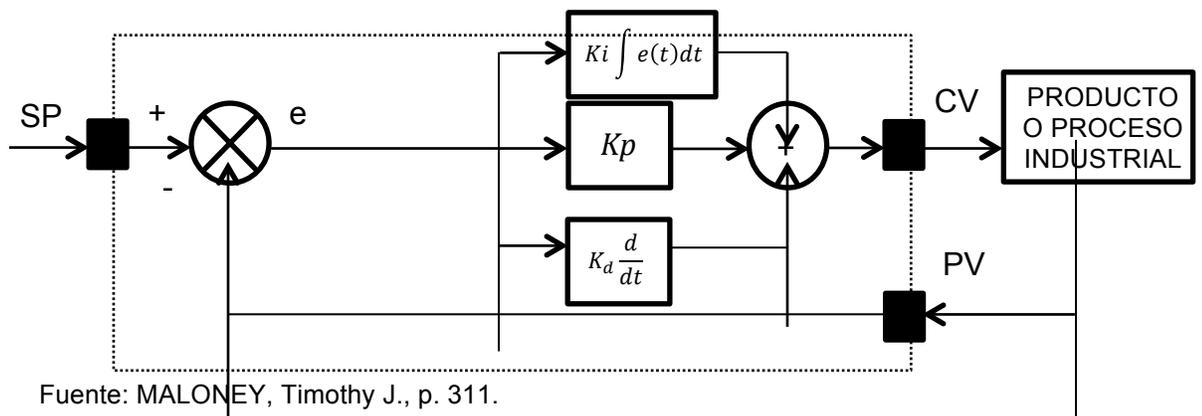
- **Acción de control proporcional derivativa⁵:** Una forma de evitar las oscilaciones que se producen en torno al punto de consigna cuando solo se utiliza el efecto proporcional, es añadir otra actuación proporcional a la derivada del error, lo que dota al sistema de una cierta capacidad de “anticipación”. Esto es debido a que la acción derivativa actúa proporcionalmente al error previsto T_d segundos más tarde, tal como se prueba a partir de la ecuación básica de un regulador PD que es:

$$K_p \left[e(t) + T_d * \frac{de(t)}{dt} \right] \cong K_p \left[e(t) + T_d * \frac{e(t + T_d) - e(t)}{T_d} \right] = K_p * e(t + T_d) \quad [4]$$

Añadiendo una acción D, en el instante t_1 se produce una actuación contraria o de “frenado”, es decir, se logra que el regulador actúe en t_1 con la actuación estimada para $t_1 + T_d$. El sistema que utiliza un regulador PD es capaz de “frenar” antes de llegar al valor de consigna y por lo tanto tiene capacidad de anticipación.

- **Control proporcional, integral y derivativo (PID)⁶:**

Figura 11 Control PID.



⁵MANDADO, Enrique., ACEVEDO, Jorge M. y FERNANDEZ, Celso, Op. cit., p.388.

⁶MALONEY, Timothy J. Electrónica Industrial Moderna. Ciudad de México: Prentice-Hall hispanoamérica, 1997, p. 311.

En el control PID, la acción correctiva es determinada por tres variables:

1. *La magnitud del error*. Esta es la parte proporcional.
2. *La integral de tiempo del error*, o la magnitud del error multiplicada por el tiempo que ha persistido. Esta es la parte integral.
3. *La razón de cambio del error con el tiempo*. Un rápido cambio del error provoca una mayor acción correctiva que un cambio de error lento. Esta es la parte derivativa.

3.4.2 Didáctica

La didáctica (del griego didaskein, "enseñar, instruir, explicar") es la disciplina científico-pedagógica que tiene como objeto de estudio los procesos y elementos existentes en la enseñanza y el aprendizaje. Es por tanto, la parte de la pedagogía que se ocupa de las técnicas y métodos de enseñanza, destinados a plasmar en la realidad las pautas de las teorías pedagógicas.

3.4.3 Filtros

Un filtro electrónico es de importancia en los sistemas electrónicos donde la frecuencia es un factor decisivo ya que este elemento tiene la capacidad de discriminar una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, para modificar tanto su amplitud como su fase, funcionan en el dominio de la frecuencia y sus principales funciones son:

- Separar componentes que se encuentran mezclados entre la señal.
- Rechazar componentes indeseables en la señal (purificar).
- Excluir señales entrantes y entregar señales deseadas.

4. ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE ANALISIS

El campo de investigación del proyecto es aplicado y se utilizarán tecnologías del campo de la electrónica, la automatización de procesos y conocimiento de la mecánica de fluidos con el fin de simular un proceso industrial.

La investigación queda limitada al estudio de 4 variables de procesos (presión, nivel y caudal) que son fundamentales para garantizar un adecuado control, en este tipo de proceso.

Una de las aplicaciones de la estación, es el control de nivel de agua en dos tanques o en uno dependiendo de la disposición o necesidad de capacidad que la persona necesite. El nivel es una variable independiente la cual se puede medir visualmente y/o detectar mediante un sensor, en este caso se busca encontrar una relación entre el nivel y la presión que esta pared de agua ejerce. La presión entonces sería en este caso la variable dependiente la cual sería captada por un sensor encargado de convertir esta presión en voltaje o amperaje mediante un transductor.

El caudal de manera básica se puede determinar mediante dos métodos experimentales, el método del objeto flotante, y el método del recipiente de volumen conocido, se tienen dos tanques de seis litros, que facilita el cálculo del caudal, el cual está determinado por las siguientes ecuaciones:

$$Q = C * V * A \quad [5]$$

C= Constante de Corrección por fricción
V= Velocidad del Fluido
A= Área

$$Q = V * T \quad [6]$$

V= Volumen Desplazado
T= Tiempo transcurrido

$$Q = V * A \quad [7]$$

V= Velocidad del Fluido
A= Área transversal del conducto

Con la correcta interpretación de esas ecuaciones se determina que el caudal, es un fluido que se mueve a determinada velocidad por determinada área, analizando la ecuación (5) se encuentra una variable que gobierna el caudal, la cual se puede alterar de manera mecánica, el área transversal del conducto, este área puede ser alterada mediante la apertura y cierre de una válvula.

Las principales variables a controlar entonces serían:

4.1 DIFERENCIA DE POTENCIAL (VOLTAJE)

Es el trabajo por unidad de carga ejercida por el campo eléctrico sobre una partícula cargada eléctricamente entre dos posiciones. Si dos puntos que tienen un diferencial de potencial se unen mediante un conductor se producirá un flujo de electrones.

Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa (generador), esta corriente cesará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico (ley de Henry).

$$V_{OUT} = k x_1 - x_0 \quad [8]$$

V_{OUT} = Voltaje de salida.
 k = Constante dieléctrica.
 x_1 = Desplazamiento final.
 x_0 = Desplazamiento inicial.

$$V = I * R \quad (Ley\ de\ Ohm) \quad [9]$$

V = Voltaje
 I = Corriente
 R = Resistencia

4.2 CAUDAL

En la dinámica de los fluidos, el caudal es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Esto quiere decir que el caudal es la cantidad de fluido, que pasa por un área en un tiempo determinado.

$$Q = V * A \quad [10]$$

Q = caudal (m³/s)
 V = velocidad (m/s)
 A = área de la sección transversal de la tubería (m²)

4.3 NIVEL

El nivel es un concepto que se originó para determinar todo aquello que tiene una altura relativa con respecto a una base, cuando dicha altura se incrementa, o decrecienta midiéndola con respecto a esa base, es cuando el nivel cambia.

4.4 PRESION

Es una magnitud física escalar que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie. La presión en síntesis, es la fuerza aplicada sobre una determinada área.

$$P = \frac{F}{A} \quad [11]$$

P = Presión

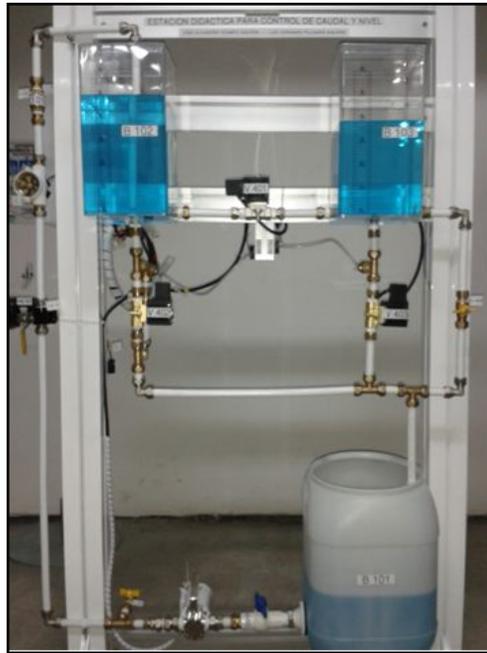
F = Fuerza

A = Area

5. CAMBIOS Y MEJORAS DE FUNCIONALIDAD FISICA

La estación didáctica contaba con varias desventajas con respecto a su funcionalidad y versatilidad física debido a que hacían falta agregar algunos elementos que mejoraran su rendimiento o cambiar algunos mecanismos que tenían poca funcionalidad o no eran los adecuados. A continuación se observa cómo era estructuralmente la estación didáctica.

Figura 12 Estructura del sistema anterior.

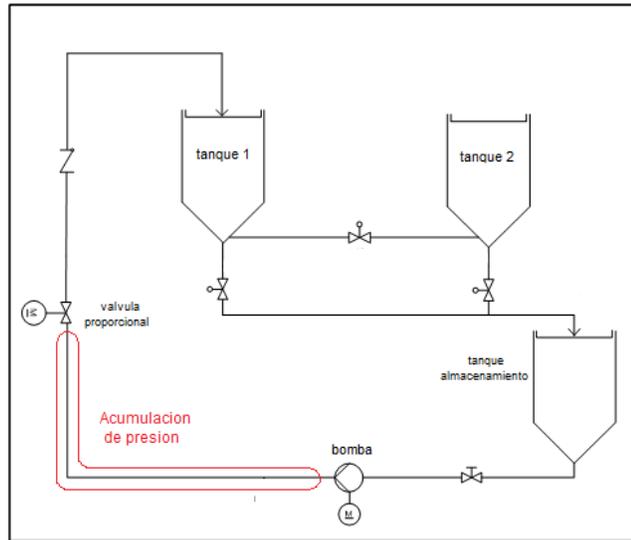


Fuente: Autores

5.1 RETORNO AL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

La estación no contaba con un retorno al tanque que permitiese el desahogo o despresurización del sistema lo cual causaba que la bomba se sobrecargara una vez se cerrara la válvula proporcional (ver imagen 13).

Figura 13 Acumulacion de presion en el sistema.



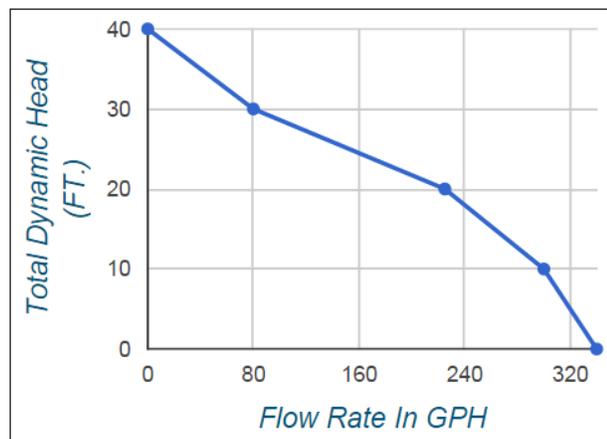
Fuente: Autores

El que esta presión aumentara dentro del sistema generaba que la bomba se sobrecargara y tuviera un calentamiento aumentando el riesgo de daño en ella, esta presión también hacia que se potenciara la presencia de fugas y daños en los empaques de las uniones.

Con el fin de solucionar este problema era necesario hacer un retorno al tanque que despresurizara esta presión acumulada, para ello se consiguió una válvula de alivio que cumpliera con las especificaciones de la bomba.

Para tener una idea de la presión que se necesitaba liberar era necesario tener en cuenta la presión máxima que daría la bomba. Con el objetivo de calcular esta presión se hace necesario la curva de rendimiento de la bomba (ver imagen 14).

Figura 14 Grafica altura vs caudal de la bomba.



Fuente: <https://www.waynepumps.com/solution-center/utility-pumps-transfer/pc1>

Tabla 1 Rendimiento de la bomba:

Altura de descarga	0'	10'	20'	30'	40'
Galones/hora	340	300	225	80	--

Fuente: <https://www.waynepumps.com/solution-center/utility-pumps-transfer/pc1>

En la tabla 1 se puede observar el caudal máximo que entrega la bomba a una altura determinada, para hallar la presión máxima que puede entregar la bomba se escoge la altura máxima, en este caso 40 pies. Estos 40 pies equivalen a la distancia máxima a la que puede elevar el agua la bomba.

Si se tiene en cuenta la ley de acción y reacción se puede decir que la presión que ejerce esos 40 pies de agua es equivalente a la presión máxima de la bomba. Siendo así se convierte esta pared de 40 pies de agua a presión ejercida. Para esto es necesario saber el peso específico del agua.

$$\text{peso específico agua} = 62 \frac{lb}{ft^3} \quad [12]$$

Para hallar la presión ejercida por 40 pies de agua se hace:

$$\text{presión} = 62 \frac{lb}{ft^3} \times 40ft \quad [13]$$

$$\text{presión} = 2480 \frac{lb}{ft^2} \quad [14]$$

Finalmente se pasa este valor a psi:

$$\text{presión} = 2480 \frac{lb}{ft^2} = 17 \text{ psi} \quad [15]$$

Teniendo en cuenta que la presión máxima que entrega la bomba es de 17 psi, se necesita una válvula de alivio cercana a este valor. Teniendo en cuenta este dato se consiguió una válvula de alivio regulable de 15 psi (ver imagen 15).

Figura 15 Valvula de alivio.



Fuente: Autores

Con el fin de poder calibrar esta válvula de alivio se hizo necesario instalar un manómetro en el sistema que permitiese regular la presión en un valor deseado. Para este caso se decidió regular la válvula de retorno a los 9 psi (ver imagen 16), ya que no se necesita mayor presión en el sistema y así se protege y alarga la vida de la bomba.

Figura 16 Regulacion a 9 psi.



Fuente: Autores

En la siguiente imagen se puede observar el sistema completo de retorno al tanque:

Figura 17 Retorno al tanque.

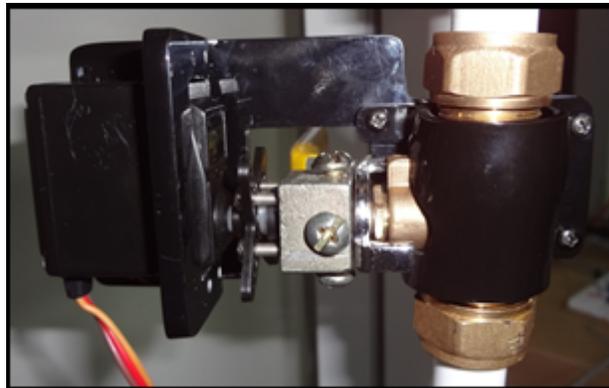


Fuente: Autores

5.2 VALVULA PROPORCIONAL

El sistema de válvula proporcional consta de una válvula manual acoplada a un servomotor. En la siguiente imagen se puede observar el sistema.

Figura 18 Valvula proporcional.

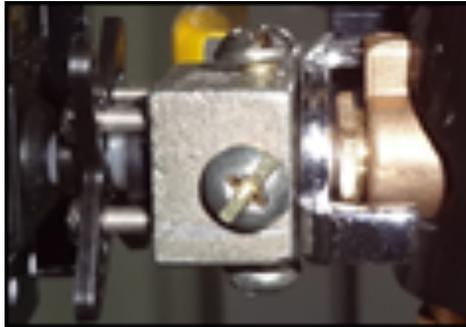


Fuente: Autores

Esta válvula tenía dos problemas que limitaban su buen funcionamiento, por lo que se hizo necesario mejorar el mecanismo y su calidad. A continuación se explican los problemas y cambios que se hicieron.

- **Mecanismo de acople válvula-servo:** El mecanismo de acople no tenía buena centricidad con el eje de la válvula lo que generaba que el servo tuviera que hacer más fuerza para poder mover el eje. Este mecanismo (ver imagen 19) tenía 4 puntos de apoyo lo cual hacía aún más difícil una buena centricidad.

Figura 19 Mecanismo de acople anterior.



Fuente: Autores

Para dar solución a este problema se debió mejorar el diseño del mecanismo, dándole un solo punto de apoyo entre el eje y el servo y garantizando una mejor centricidad. Este mecanismo se mandó a hacer en un taller especializado y que tuviera las herramientas necesarias. A continuación se puede observar el mecanismo mejorado.

Figura 20 Mecanismo de acople actual.



Fuente: Autores

- **Servo:** El servo de modelo TowerPro SG-5010 utilizado en este caso no cumplía con las necesidades de carga y potencia necesarias para esta aplicación. El servo era un modelo para sistemas de carga mucho menor y tenía una piñonería de plástico que no garantizaba un buen agarre, generando una falla y daño en ella. A continuación se muestran las especificaciones de torque y potencia de este servo.

Tabla 2 Especificaciones del servo TowerPro SG-5010:

Modulación	Digital
Torque	4.8v : 5.5 kg/cm
	6.0v : 6.5 kg/cm
Velocidad	4.8v : 0.19 seg/60°
	6.0v : 0.15 seg/60°
Peso	47.0 g
Dimensiones	Largo : 40.6 mm
	Ancho : 20.5 mm
	Altura : 38.0 mm
Tipo de motor	3 – polos
Tipo de engranaje	Plástico

Fuente: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/sg-5010>

Debido a que este servo ya estaba dañado y tenía los engranajes desgastados se decidió comprar el servo TowerPro MG995 (ver imagen 21).

Figura 21 Servo TowerPro MG995.



Fuente: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg995>

Este servo tiene mejores características, en especial un mayor torque y una piñonería metálica, lo cual mejora bastante el funcionamiento de la válvula proporcional. En la siguiente tabla se pueden ver sus especificaciones.

Tabla 3 Especificaciones del servo TowerPro MG995:

Modulación	Digital
Torque	4.8v : 9.4 kg/cm
	6.0v : 11.0 kg/cm
Velocidad	4.8v : 0.20 seg/60°
	6.0v : 0.16 seg/60°
Peso	55.0 g
Dimensiones	Largo : 40.7 mm
	Ancho : 19.7 mm
	Altura : 42.9 mm
Tipo de motor	3 – polos
Tipo de engranaje	Metal

Fuente: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg995>

Con estas mejoras y un adecuado mantenimiento, lubricando y puliendo la bola interna de la válvula, se mejoró sustancialmente el funcionamiento de la válvula de regulación, con resultados positivos y un adecuado desplazamiento del servo. En la siguiente imagen se puede ver como quedo el mecanismo final.

Figura 22 Válvula proporcional con mejoras.



Fuente: Autores.

6. CAMBIOS Y MEJORAS ELECTRONICAS

La estación contaba con sensores de muy buena calidad que tal vez no estaban bien calibrados o caracterizados adecuadamente para su función y algunos no eran los apropiados para la aplicación que se pretendía en la estación didáctica. También a algunos actuadores no se les hizo un buen aislamiento para que no interfiriera en las señales de control y algunos otros eran innecesarios o generaban más problemas que los que solucionaban. A continuación se manifestaran algunos de estos problemas encontrados y se explicara qué solución se encontró.

6.1 VALVULA PROPORCIONAL

Para el control de la válvula proporcional hay que tener en claro el funcionamiento del servomotor. El servomotor será el encargado de girar la válvula mecánica (ver imagen 23) a la ubicación que se necesite en el control, ya sea cerrando o abriendo el paso de agua y de esta manera aumentar o disminuir el caudal necesario.

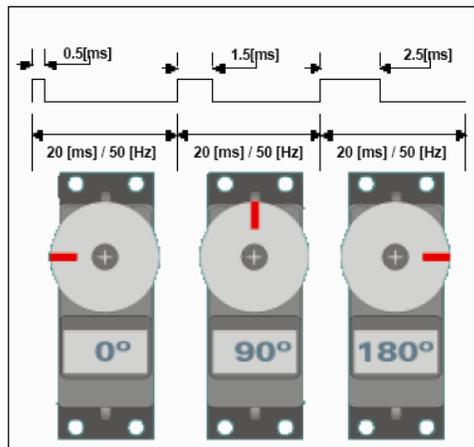
Figura 23 Válvula mecánica de bola.



Fuente: Autores

El servomotor dará una posición de acuerdo a la modulación del ancho de pulso (PWM) que se entregue a su señal de control, dependiendo del ancho del pulso el servo se moverá a un ángulo (ver imagen 24)

Figura 24 Funcionamiento servo.



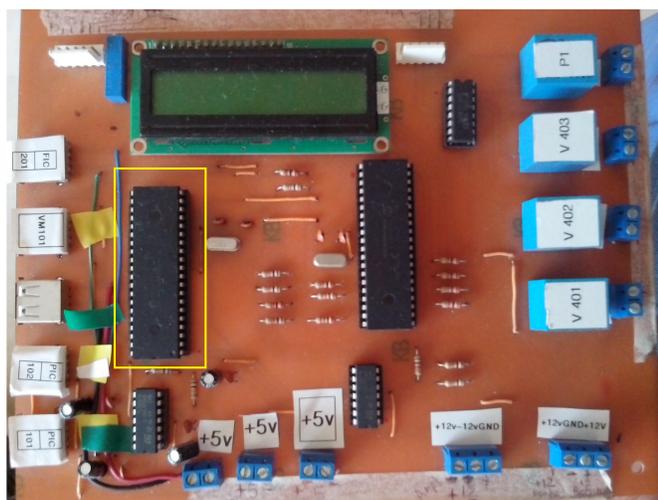
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos60/servo-motores/servo-motores2.shtml>

En la imagen se puede ver que dependiendo de la duración en alto del pulso, el servo se moverá a un ángulo entre 0° y 180°.

6.1.1 Driver para control del servomotor

Anteriormente el control del servomotor se realizó con un microcontrolador PIC, el cual se encontraba en la tarjeta madre. Este PIC se programó como un servo drive, pero el que se encontrara en la tarjeta madre dificultaba su funcionamiento, en la imagen 25 se puede observar que este PIC se encontraba en la misma tarjeta donde llegaban las señales de los actuadores y demás, haciendo más complejo un correcto funcionamiento debido a ruidos e interferencias.

Figura 25 Ubicación PIC servo drive.



Fuente: Autores

Con el fin de evitar estos problemas, se decidió hacer una tarjeta aparte que solo tuviera la función de servo drive. El servo drive se realizó de la siguiente manera:

- **Programación del microcontrolador ATmega328**

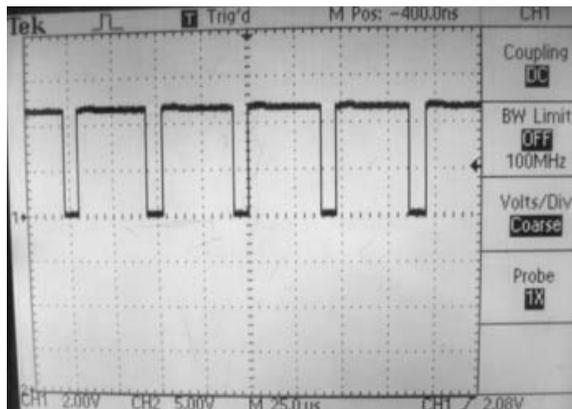
Se escogió el microcontrolador ATmega328, debido a que es el mismo que tienen las placas de Arduino, lo cual facilita mucho la programación y además hace más versátil el programa por la cantidad de opciones de software gratis que se encuentran en el internet.

Para una adecuada programación del microcontrolador hay que tener muy en claro cuál va hacer el funcionamiento en general que se desea.

En este caso se pretende realizar un servo drive con posicionamiento mediante una señal analógica de control de 0VDC a 5VDC, siendo estos los rangos mínimos y máximos, esta señal se enviara desde la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (NI) a el microcontrolador, por lo tanto, debe realizarse un posicionamiento proporcional a dicha señal de 0° a 90°. Dependiendo de la señal de control análoga de entrada, se enviara un PWM como salida, el cual será equivalente a una posición entre los 0° y 90° del servomotor.

En la siguiente imagen se puede observar la señal de control PWM que sale del microcontrolador hacia el servo.

Figura 26 Señal PWM control servo.

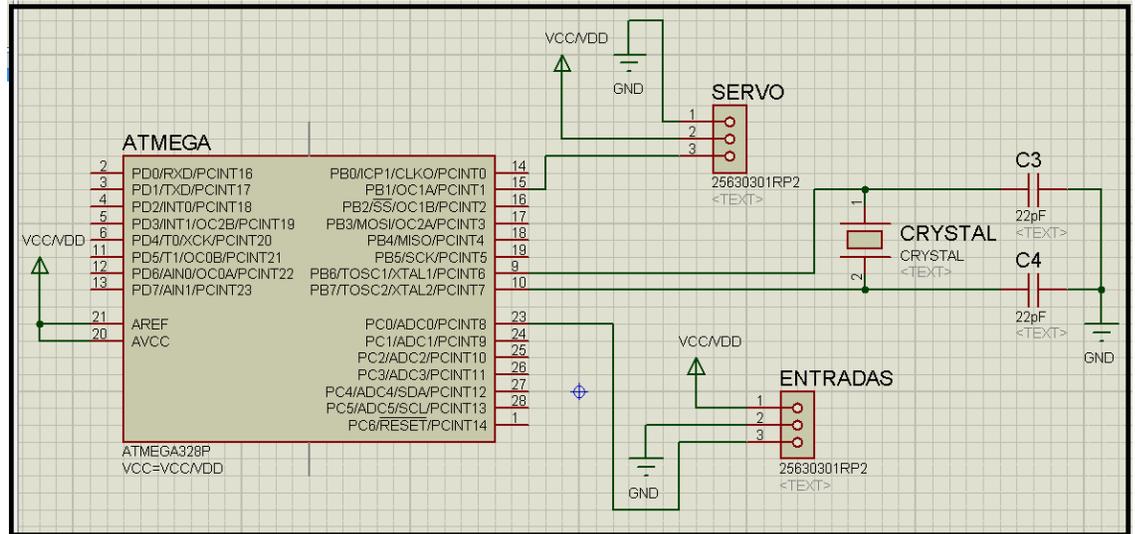


Fuente: Autores

- **Tarjeta servo drive**

Para la construcción de la tarjeta del servo drive se debió diseñar un circuito el cual tuviera el microcontrolador con su respectivo reloj y los conectores de entradas y salidas. En la siguiente imagen se puede observar el circuito que se diseñó en el programa PROTEUS isis.

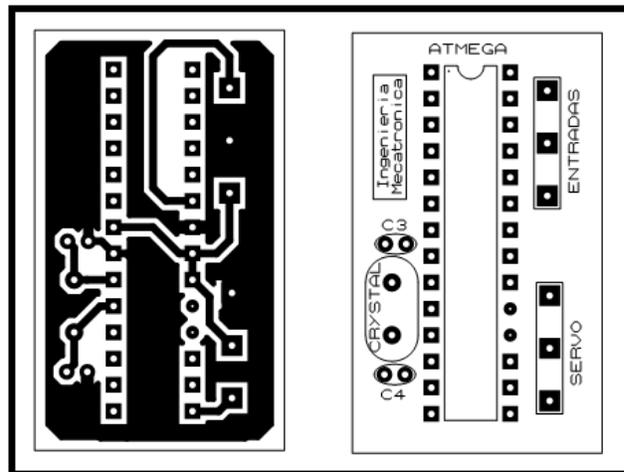
Figura 27 Circuito servo drive.



Fuente: Autores

Una vez se obtuvo el circuito diseñado en PROTEUS isis, se pasó a diseñar el circuito impreso en el PROTEUS ares. En la siguiente imagen se puede observar el circuito impreso diseñado.

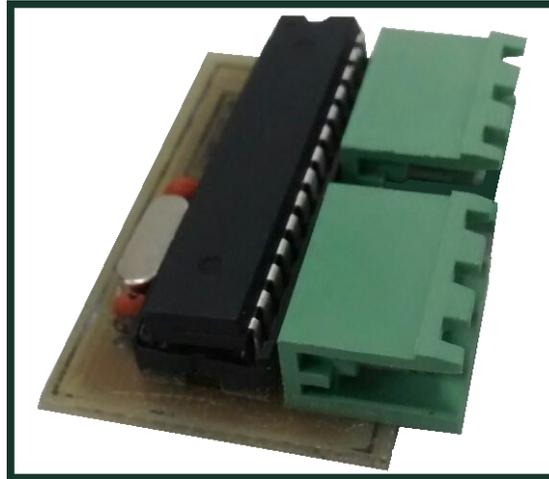
Figura 28 Circuito impreso servo drive.



Fuente: Autores

A continuación se puede observar la tarjeta para el servo drive ya terminada:

Figura 29 Tarjeta terminada servo drive.

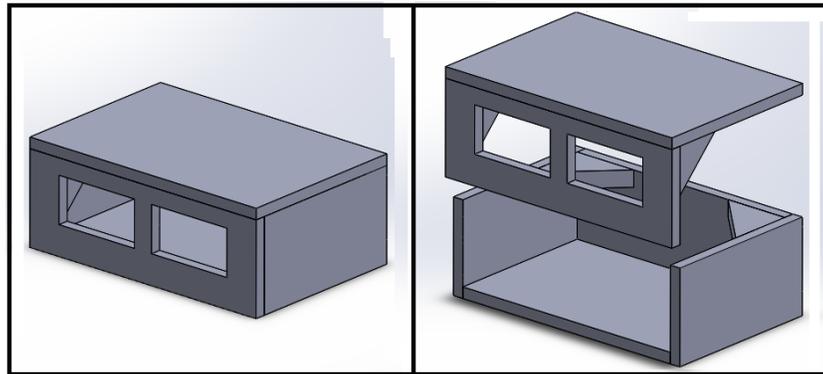


Fuente: Autores

- **Caja para el servo drive**

Se diseñó una caja para contener la tarjeta del servo drive con el fin de protegerla y además para darle un mejor aspecto. Esta caja se diseñó mediante SolidWorks, en la siguiente imagen se puede observar el diseño de la caja.

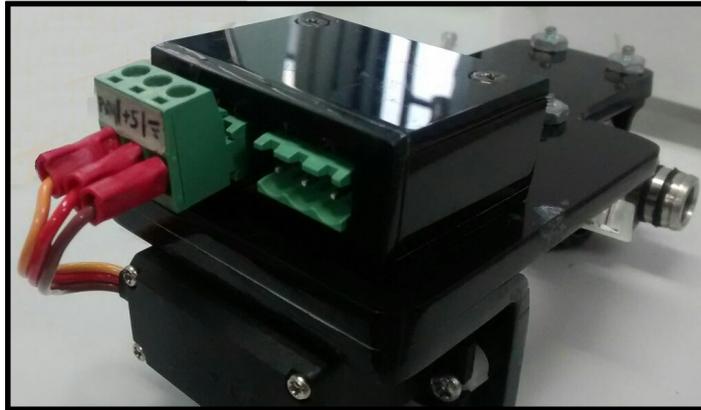
Figura 30 Caja para el servo drive.



Fuente: Autores

Una vez se obtuvo el diseño deseado, se mandó a hacer la caja en acrílico con las medidas respectivas y además se pegó a la estructura en acrílico de la válvula proporcional para tener una conexión más rápida y facilitando un diseño más adecuado. En la siguiente imagen se puede observar la caja ya terminada y pegada a la estructura de la válvula.

Figura 31 Válvula proporcional terminada con servo drive.



Fuente: Autores

6.2 SENSOR DE NIVEL

La detección de nivel en la estación se hacía con un sensor de presión ubicado en el fondo del tanque. El funcionamiento de este sensor (ver imagen 32) era el siguiente: al aumentar el nivel de agua en el tanque, aumenta la presión que ejerce la pared de agua sobre el fondo del tanque, este delta de presión es el que detecta el sensor.

Figura 32 Sensor de presión.



Fuente: Autores

Al principio se decidió utilizar este mismo sensor para este caso. Debido a que se tenía que caracterizar este sensor se hizo evidente que la señal que entregaba tenía bastante ruido y más si se tenía en cuenta que el rango de presión que se iba a medir no era muy grande comparado con el ruido que se generaba en la señal.

Anteriormente lo que se había hecho, debido a que el delta de voltaje era tan bajo (en escala de mV) a causa del rango tan pequeño de presión que se daba en los

tanques como se muestra en la tabla 4, se pensó en aumentar el voltaje con amplificadores, pero esto no resultó debido a que se aumentaba también el ruido que se generaba en la señal.

Tabla 4 Muestras tomadas del sensor:

cantidad agua en mililitros(ml)	Multímetro Fluke		Multímetro Goldstar	
	llenado en mili voltios(mV)	vaciado en mili voltios(mV)	llenado en mili voltios(mV)	vaciado en mili voltios(mV)
0	180,8	205,9	181,2	206,1
200	200,5	245,7	200,9	246,1
400	204,3	249,4	204,7	249,7
600	208	254,4	208,4	254,7
800	212,1	258,2	212,3	258,1
1000	215,6	262,2	215,9	262,4
1200	219,6	266,2	220,1	266,4
1400	223,7	268,8	224,1	269,1
1600	227,2	272,1	227,6	272,4
1800	231,2	276,3	231,8	276,7
2000	235,2	279,6	235,8	279,9
2200	238,8	283,3	239,3	283,6
2400	242,5	286,4	242,9	286,7
2600	246,7	291,1	246,5	291,4
2800	250	299,3	250,4	294,6
3000	254,1	296,5	254,5	296,1
3200	258,6	300,9	258,2	301,1
3400	262,1	302,1	262,7	302,3
3600	266,2	301,6	265,9	301,3
3800	269,8	302,6	270,3	302,5
4000	273,4	306,4	273,9	306,7
4200	277,4	309,7	277,7	310,1
4400	281,1	311,4	281,6	311,5
4600	285	315,1	285,5	319,1
4800	288,8	319,7	289,2	324,1
5000	293,5	324,4	293,9	329,1
5200	296,7	325,6	297,1	330,1
5400	300,2	330,1	300,7	335,1
5600	303,9	334,4	304,4	339,1
5800	308	338,6	308,5	343,1
6000	312,1	314,2	312,6	314,7

Fuente: José A. Ocampo, & LUIS H. Pulgarin, E. (2013). Diseño y construcción de una estación didáctica para control de caudal y nivel. Tesis. Colombia.

Al ver las especificaciones de este sensor con referencia “MPX5100DP CASE 857C-05” de la empresa “Freescale Semiconductor” (ver imagen 33) se puede observar que el rango de medición del sensor es muy grande en comparación con la presión que se maneja en los tanques.

Figura 33 Rango de presión del sensor MPX5100DP.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾ Gauge, Differential: MPX5100D/MPX5100G/MPXV5100G Absolute: MPX5100A	P _{OP}	0 15	— —	100 115	kPa

Fuente: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5100.pdf?psll=1

El rango de sensado del sensor es de 0 a 100 kPa, equivalentes a un rango de 0 a 15 psi, si se tiene en cuenta que la presión máxima que se va a tener en los tanques es de acuerdo a la columna de agua máxima, que es de aproximadamente 25 cm (0.833 pies), se tiene que la presión máxima en los tanques es:

$$presion = 62 \frac{lb}{ft^3} \times 0.833 ft \quad [16]$$

$$presion = 52.6 \frac{lb}{ft^2} \quad [17]$$

Finalmente se pasa este valor a psi:

$$presion = 52,6 \frac{lb}{ft^2} = 0.3 psi \quad [18]$$

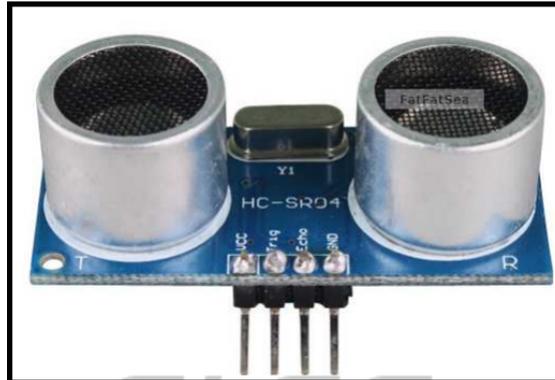
Como se puede ver la presión máxima que se puede tener en los tanques es de aproximadamente 0.3 psi, siendo esta muy pequeña como para utilizar este sensor de presión.

6.2.1 Sensor ultrasónico

A causa que el sensor de presión no se pudo utilizar en esta aplicación se debió buscar otra solución. Después de mirar varias opciones, se llegó a la conclusión que el mejor sensor para esta aplicación sería un sensor ultrasónico. Se escogió un sensor ultrasónico en vista que son económicos y tienen una buena receptibilidad para este tipo de aplicaciones.

El sensor de ultrasonido elegido es el HC - SR04 (ver imagen 34) el cual puede llegar a tener una precisión de 3mm.

Figura 34 Sensor Ultrasónico HC – SR04.



Fuente: <http://e-radionica.com/productdata/HCSR04.pdf>

Con el fin de poder usar este sensor como sensor de nivel, se tuvieron que seguir varios pasos, a continuación se aclarara el proceso que se llevó acabo para utilizar este sensor ultrasónico como sensor de nivel.

- **Programación del microcontrolador ATmega328**

Como en el caso del servo driver, se utilizó un ATmega328 con la idea de utilizar la versatilidad del Arduino y sus librerías. Este sensor en especial está muy conectado al uso del Arduino y se encuentran muy buenas librerías para su uso.

El principio de funcionamiento de este sensor es similar al de un radar o un sonar. El genera un sonido de alta frecuencia y calcula el intervalo de tiempo entre el envío de la señal y la llegada del eco.

Una vez se tiene el tiempo que se demoró la señal, se puede calcular la distancia teniendo en cuenta que esta viaja a la velocidad del sonido.

$$velocidad\ del\ sonido = 340.29\ m/s = 0.034029\ cm/us \quad [19]$$

Entonces el sonido se demora en recorrer un cm:

$$Tiempo\ en\ recorrer\ un\ cm = 29.38\ us/cm \quad [20]$$

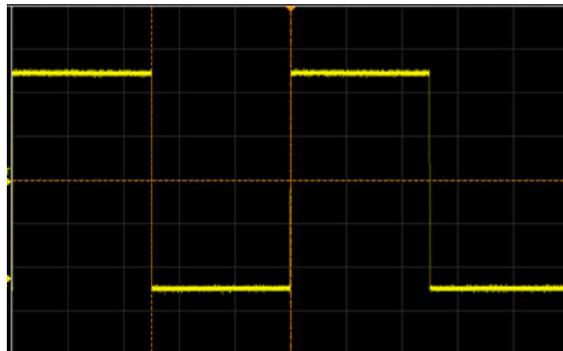
Sabiendo que el sonido recorre un cm en 29.38 us se puede calcular fácilmente la distancia que recorrió la señal del ultrasonido así:

$$distancia = \frac{intervalo\ de\ tiempo\ envio/eco}{2 \times 29.38\ us} \quad [21]$$

Se divide por 2 porque hay que tener en cuenta que la distancia que recorre la señal es el doble porque va y vuelve.

Teniendo la distancia se puede mandar una señal de salida análoga que equivalga al nivel, en este caso una señal de PWM con una resolución de 255 que es la que maneja este tipo de microcontrolador. Debido a que este microcontrolador no tiene una salida análoga como tal se debe hacer un tratamiento a esta señal PWM para convertirla en análoga.

Figura 35 Salida PWM del microcontrolador.



Fuente: Autores

El PWM dependerá del nivel que se presente en el tanque, un nivel mínimo equivaldrá a 0 PWM y un nivel máximo equivaldrá a 255 PWM. En la siguiente tabla se muestra el valor de PWM que se genera por nivel.

Tabla 5 Distancia - PWM:

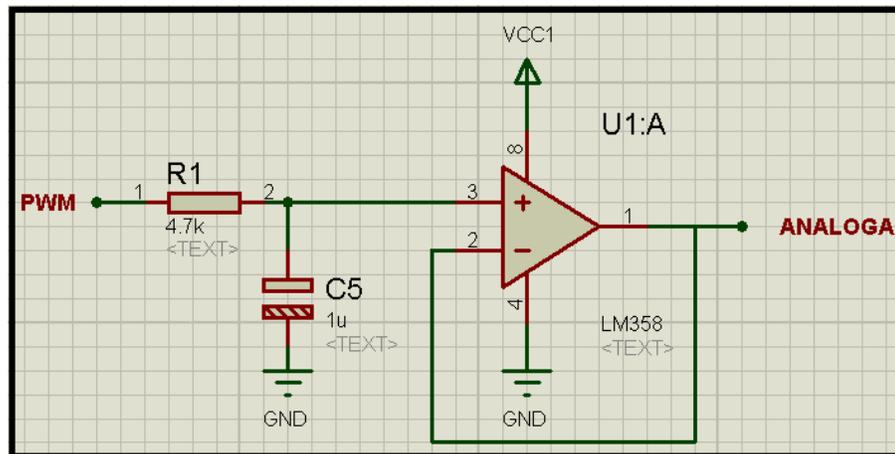
Distancia (cm)	PWM	Distancia (cm)	PWM
1	10	14	142
2	20	15	153
3	31	16	163
4	41	17	173
5	51	18	183
6	61	19	194
7	71	20	204
8	82	21	214
9	92	22	224
10	102	23	235
11	112	24	245
12	122	25	255
13	132	--	--

Fuente: Autores

- **Tratamiento señal PWM a analoga**

Debido a que la tarjeta de adquisición de datos de la NI (*National Instruments*) solo acepta señal analoga de entrada, se debe convertir la señal PWM a analoga. Para hacer esta conversión se debió realizar el siguiente circuito con amplificadores operacionales:

Figura 36 Circuito conversión PWM a analoga.



Fuente: Autores

Una vez montado el conversor PWM a analoga se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 6 Distancia – analoga (V):

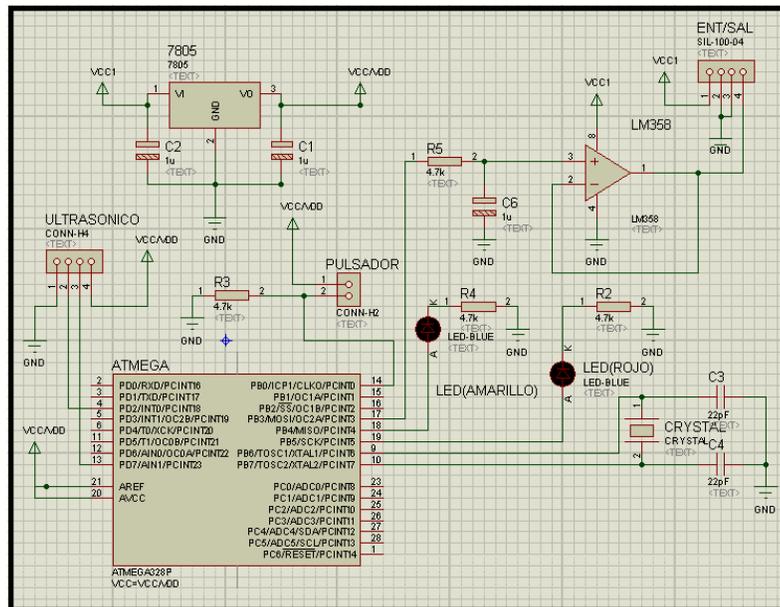
Distancia (cm)	Voltaje (V)	Distancia (cm)	Voltaje (V)
1	0,2	14	2,8
2	0,4	15	3
3	0,6	16	3,2
4	0,8	17	3,4
5	1	18	3,6
6	1,2	19	3,8
7	1,4	20	4
8	1,6	21	4,2
9	1,8	22	4,4
10	2	23	4,6
11	2,2	24	4,8
12	2,4	25	5
13	2,6	--	--

Fuente: Autores

- **Tarjeta para el sensor de nivel**

El circuito para el sensor de nivel se diseñó en PROTEUS isis, allí se tomó en cuenta el voltaje de alimentación del amplificador operacional, que es de 12V y se colocó un regulador de voltaje para reducir a 5V y poder alimentar el ultrasónico y el microcontrolador, en la siguiente imagen se puede observar el circuito.

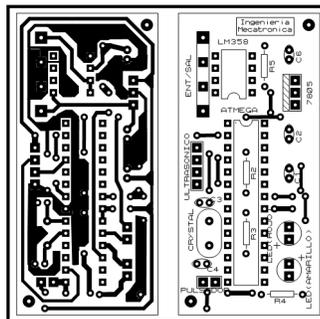
Figura 37 Circuito para sensor de nivel.



Fuente: Autores

Una vez se monta el circuito en PROTEUS isis, se exporta al ares y allí se diseña el circuito impreso. El circuito impreso se diseñó intentando hacerlo lo más pequeño posible y que tuviera una geometría de acuerdo a las dimensiones del sensor ultrasónico. En la siguiente imagen se puede observar el circuito impreso:

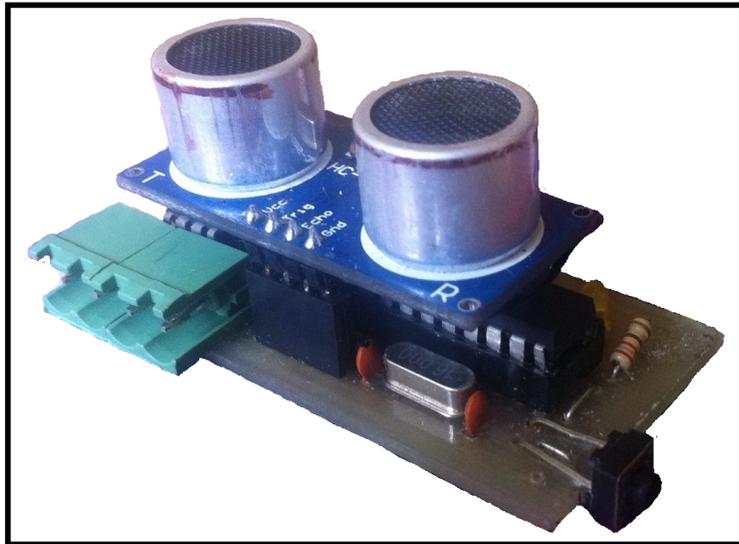
Figura 38 Circuito impreso sensor de nivel.



Fuente: Autores

A continuación se puede observar la tarjeta para el sensor de nivel ya terminada:

Figura 39 Tarjeta terminada sensor de nivel.

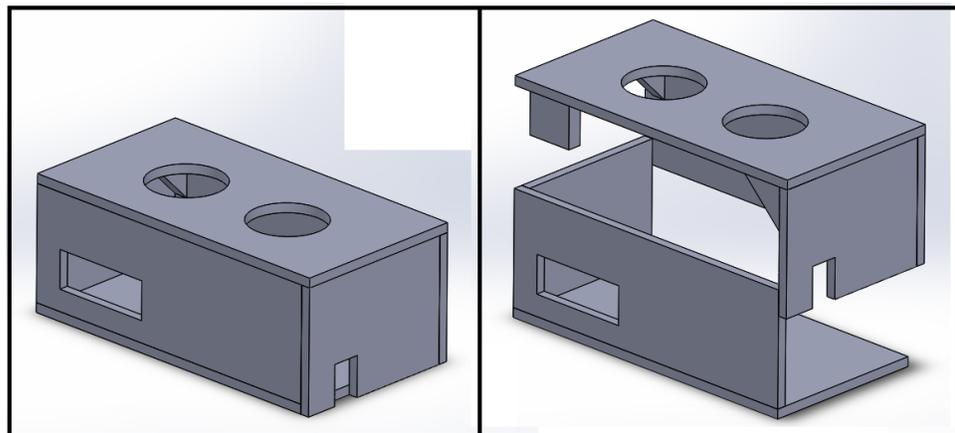


Fuente: Autores

- **Caja para el sensor de nivel**

Se diseñó una caja para contener la tarjeta del sensor de nivel con el fin de protegerla y además para darle un mejor aspecto. Esta caja se diseñó mediante SolidWorks, en la siguiente imagen se puede observar el diseño de la caja.

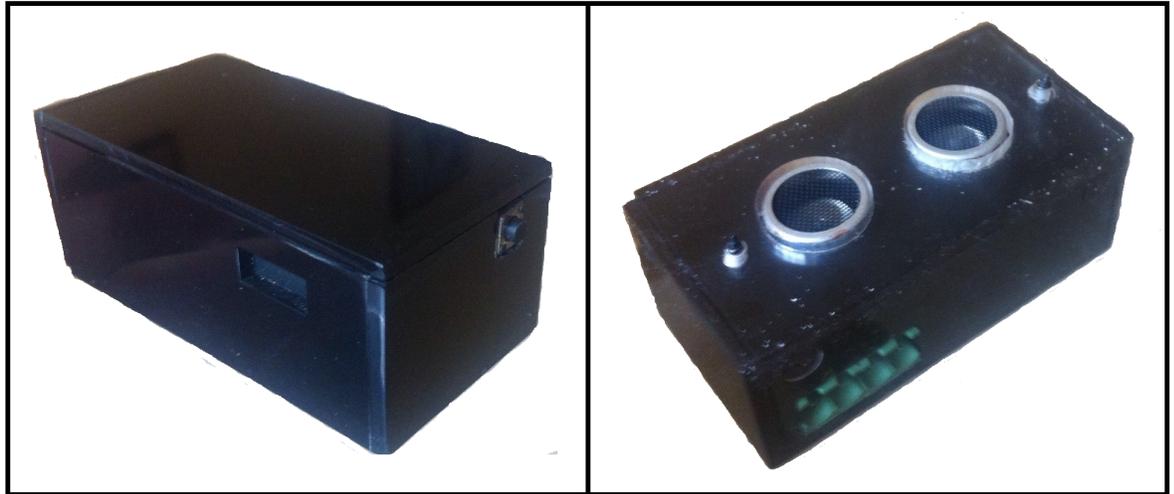
Figura 40 Caja para el sensor de nivel.



Fuente: Autores

Una vez se obtuvo el diseño deseado, se mandó a hacer la caja en acrílico con las medidas respectivas teniendo en cuenta cada detalle en el diseño, un espacio para el pulsador (ceros) y una ventana de visualización de los leds de estado. En la siguiente imagen se puede observar la caja ya terminada con el circuito del sensor en su interior. De estos sensores se hicieron dos, uno para cada tanque.

Figura 41 Sensor de nivel terminado.



Fuente: Autores

6.3 SENSOR DE PRESION

Debido a que no se utilizaron los sensores de presión para medir el nivel en los tanques y viendo que el rango de medición de estos correspondían o eran los adecuados para medir la presión que se genera en el sistema, se decidió utilizarlos como sensores de presión. Solo se utilizó uno, el cual mide la presión que se genera en la bomba, este se ubicó al lado del manómetro como se ve en la imagen 42.

Figura 42 Ubicación del sensor de presión.



Fuente: Autores

Estos sensores tienen un rango de medición de 0 a 15 psi, y en el sistema solo se tendrá una presión máxima de 9 psi, para poder hacer un adecuado acondicionamiento de la señal, se debió caracterizar el sensor.

6.3.1 Caracterización del sensor de presión.

Para la caracterización del sensor se utilizó el manómetro como punto de referencia y calibración. Mediante una jeringa se inyectó aire al manómetro y a su vez al sensor que iba conectado en paralelo (ver imagen 43). A medida que iba cambiando la presión, cambiaba la salida análoga del sensor.

Figura 43 Calibración del sensor de presión.



Fuente: Autores

Los datos se repitieron 2 veces, para cada sensor de presión con el fin de tener una base de datos confiable, en la siguiente tabla se muestran los valores entregados por el primer sensor de presión:

Tabla 7 Datos sensor de presión 1:

SENSOR DE PRESION 1	
Presión (PSI)	Voltaje (V)
0	0,2
1	0,47
2	0,7
3	1,04
4	1,34
5	1,62
6	1,94
7	2,2
8	2,55
9	2,86
10	3,12
11	3,5
12	3,79
13	4,11
14	4,42
15	4,7

Fuente: Autores.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos con el sensor 2.

Tabla 8 Datos sensor de presión 2:

SENSOR DE PRESION 2	
Presión (PSI)	Voltaje (V)
0	0,2
1	0,43
2	0,7
3	1,01
4	1,33
5	1,62
6	1,94
7	2,2
8	2,57
9	2,85
10	3,12
11	3,5
12	3,78
13	4,09
14	4,39
15	4,7

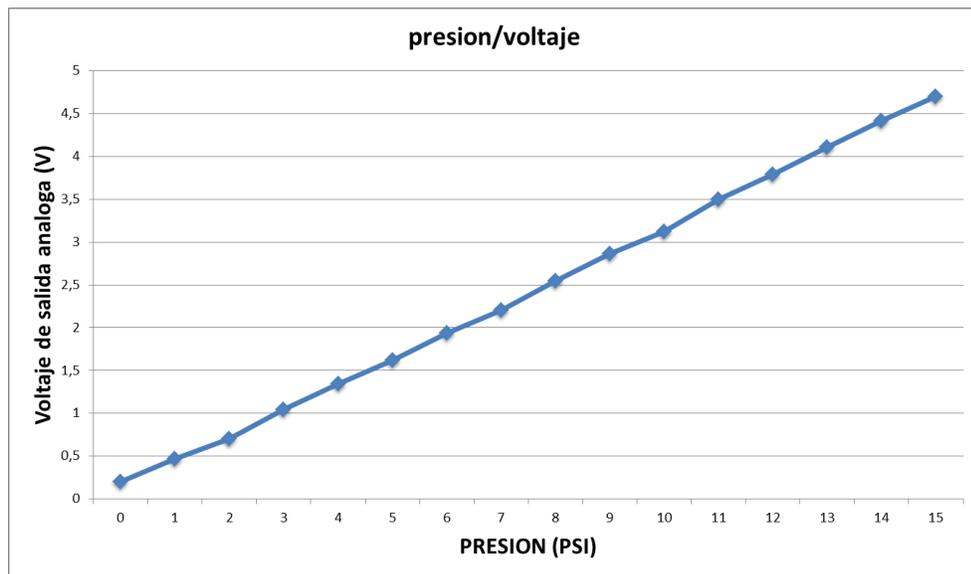
Fuente: Autores.

Como se puede observar en los resultados los valores obtenidos entre sensor no vario, lo cual hace confiable la medición y una correcta caracterización. Una vez obtenida la caracterización se analizan los datos y se llega a la conclusión de que los voltajes son lineales, pero no están normalizados. Cuando la presión es mínima (0 psi) la salida de voltaje marca 0,2 V y cuando la presión es máxima marca 4,7, haciendo que sea necesario normalizar de 0 a 5V.

6.3.2 Normalización de la señal del sensor de presión.

Para lograr normalizar la señal del sensor de presión de 0 a 5V, se hace necesario un procedimiento matemático básico. Teniendo en cuenta que la señal es lineal (ver imagen 44).

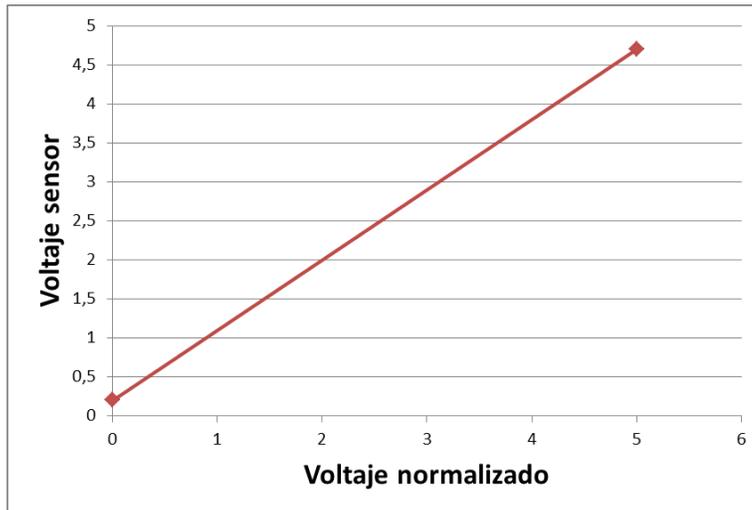
Figura 44 Linealidad del sensor de presión.



Fuente: Autores.

Se necesita que la salida al normalizar la señal sea de 0 a 5V, por lo que se hace necesario aplicar la ecuación de la recta entre la señal de salida de sensor (0,2 a 4,7V) y la señal normalizada (0 a 5V), en la siguiente imagen se muestra esta gráfica.

Figura 45 Voltaje sensor - Voltaje normalizado.



Fuente: Autores.

Aplicando la ecuación de la recta para esta grafica se obtiene:

$$Y = mX + B \quad [22]$$

$$V_{sensor} = (m * V_{normalizado}) + B \quad [23]$$

Reemplazando, se tiene:

$$4,7 = (m * 5) + 0,2 \quad [24]$$

Despejando m:

$$m = \frac{4,7 - 0,2}{5} \quad [25]$$

$$m = 0,9 \quad [26]$$

Entonces finalmente se concluye que:

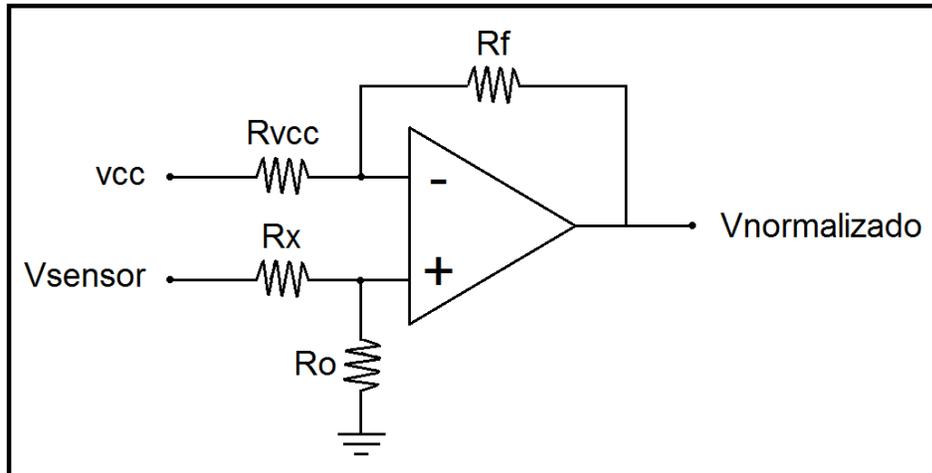
$$V_{normalizado} = \frac{V_{sensor} - 0,2}{0,9} \quad [27]$$

$$V_{normalizado} = 1,111V_{sensor} - 0,222 \quad [28]$$

Una vez se obtiene la ecuación de la recta que representa el voltaje normalizado, se procede a realizar el diseño con amplificadores operacionales. Mediante las funciones de los amplificadores operacionales se puede realizar esta

normalización. Se deben hallar los valores de las resistencias necesarias para el siguiente circuito (ver imagen 46).

Figura 46 Circuito con amplificadores operacionales.



Fuente: Autores.

Si dice que:

$$V_{normalizado} = 1,111V_{sensor} - 0,222 = 1,111V_{sensor} - \frac{0,222 \times vcc}{vcc} \quad [29]$$

Y

$$vcc = 5v \quad [30]$$

Entonces:

$$V_{normalizado} = 1,111V_{sensor} - 0,0444 \times vcc \quad [31]$$

Para hallar los valores de las resistencias se calcula Δ :

$$\begin{aligned} A &= 1,111 \\ B &= 0,0444 \\ At &= A - B - 1 = 0,0666 \\ \Delta &= \sup\{A; (B + 1); |At|\} = \sup\{1,111; 1,0444; 0,0666\} \\ \Delta &= \mathbf{1,111} \end{aligned}$$

Se encuentran los valores de las resistencias:

$$\begin{aligned} Rf &= \Delta \times 20k \\ Rf &= 1,111 \times 20k \\ Rf &= \mathbf{22,22k} \end{aligned} \quad [32]$$

Se halla el valor de Rvcc:

$$Rvcc = \frac{Rf}{B} \quad [33]$$

$$Rvcc = \frac{22,22K}{0,0444}$$

$$Rvcc = \mathbf{500k}$$

Debido a que el valor máximo de esta resistencia puede ser 300k, se escoge una resistencia de 270k, ya que es más comercial. Entonces:

$$Rvcc = \mathbf{270k} \quad [34]$$

Se vuelve a calcular Rf para este valor de resistencia:

$$\begin{aligned} Rf &= Rvcc \times B \\ Rf &= 270k \times 0,0444 \\ Rf &= \mathbf{12k} \end{aligned} \quad [35]$$

Se calcula Rx:

$$Rx = \frac{Rf}{A} \quad [36]$$

$$Rvcc = \frac{22,22K}{1,111}$$

$$Rvcc = \mathbf{10,8k}$$

Y finalmente se calcula Ro:

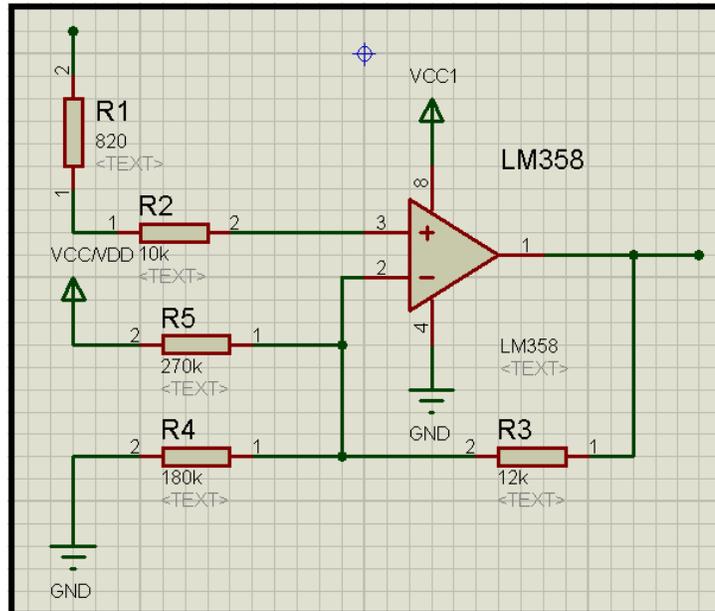
$$Ro = \frac{Rf}{At} \quad [37]$$

$$Rvcc = \frac{22,22K}{0,0666}$$

$$Rvcc = \mathbf{180k}$$

Una vez se hallaron los valores de las resistencias se simulo el circuito en PROTEUS, en la siguiente imagen se puede observar el circuito realizado.

Figura 47 Circuito de normalización PROTEUS.



Fuente: Autores.

Después de la simulación se montó físicamente y se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 9 Datos normalización de señal:

Normalización de señal	
Presión (PSI)	Voltaje (V)
0	0
1	0,27
2	0,55
3	0,91
4	1,25
5	1,57
6	1,93
7	2,23
8	2,63
9	2,94
10	3,24
11	3,66
12	3,97
13	4,32
14	4,65
15	5

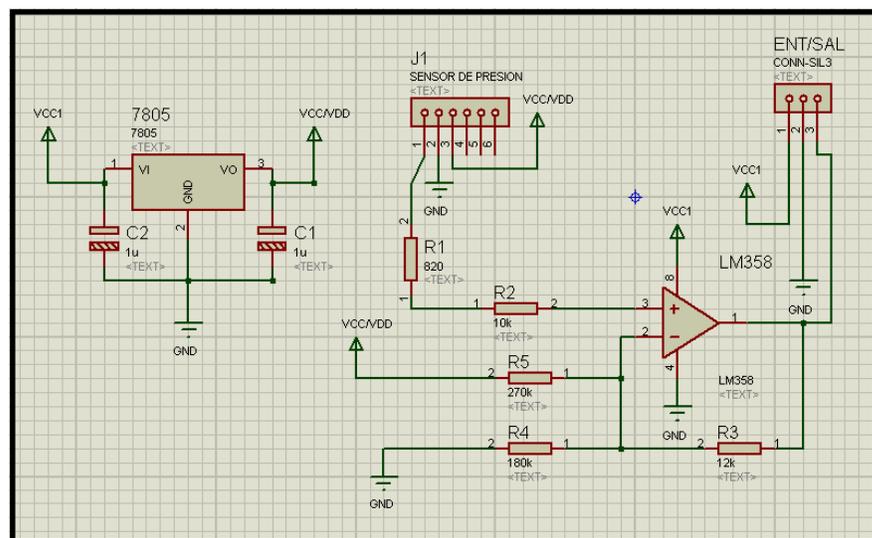
Fuente: Autores.

Como se puede observar la señal quedo normalizada de 0 a 5V, por lo que este circuito fue escogido para esta función. El circuito se montó en una tarjeta al igual que los demás sensores.

6.3.3 Tarjeta para el sensor de presión

El circuito para el acondicionamiento de señal del sensor de presión al igual que los demás se diseñó en PROTEUS isis, en la siguiente imagen se puede observar el circuito.

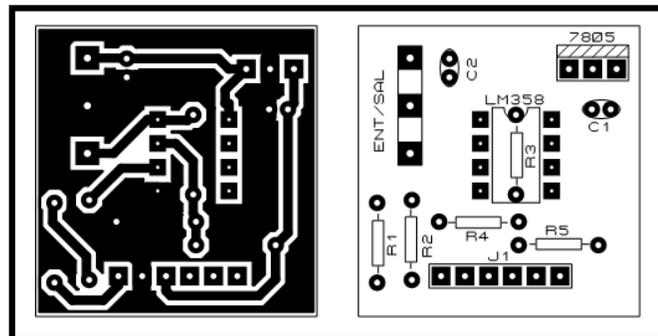
Figura 48 Circuito para sensor de presión.



Fuente: Autores

En la siguiente imagen se puede ver el circuito impreso diseñado en PROTEUS ares:

Figura 49 Circuito impreso sensor de presión.



Fuente: Autores

A continuación se puede observar la tarjeta para el sensor de presión ya terminada:

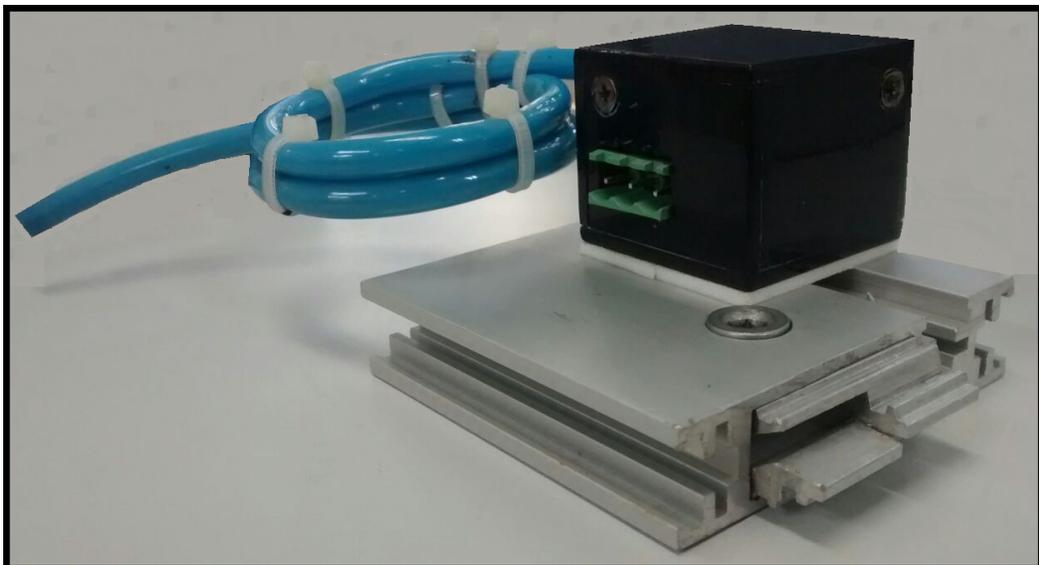
Figura 50 Tarjeta terminada sensor de presión.



Fuente: Autores

Al igual que los demás sensores se diseñó una caja para contener la tarjeta del sensor de presión con el fin de protegerla y además para darle un mejor aspecto. Esta se mandó a hacer en acrílico con las mismas características que las otras cajas. En la siguiente imagen se puede observar la caja ya terminada con el circuito del sensor en su interior y la manguera de conexión.

Figura 51 Sensor de presión terminado.



Fuente: Autores

6.4 TARJETA PARA EL CONTROL DE LA BOMBA

6.4.1 Circuito de aislamiento de la bomba

La bomba WAYNE de serie PC1 es un actuador que consume bastante corriente por lo que se hizo necesario aislarla completamente de la señal de control. La señal de control la genera la DAQ de la National Instruments. Esta señal digital tiene una amplitud de 5V, y la bomba tiene una alimentación de 12V, a continuación se pueden observar las especificaciones de voltaje y corriente de esta bomba:

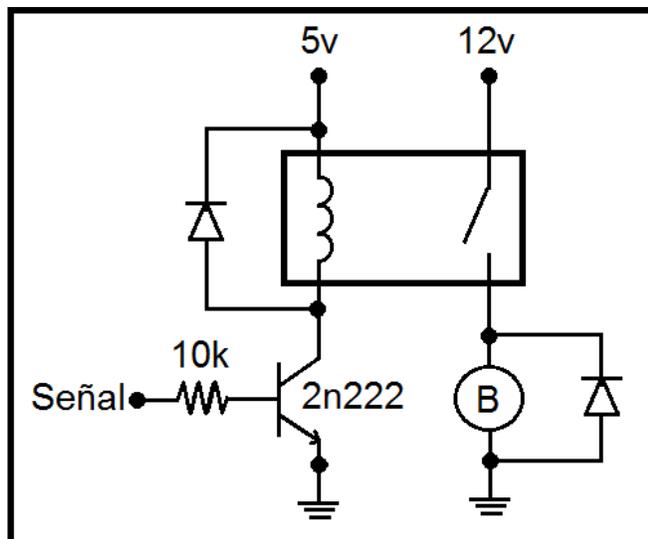
Tabla 10 Requerimientos de la bomba:

Requerimientos PC1	
Voltaje	12V
Amperaje	14A

Fuente: https://www.waynepumps.com/sites/default/files/321205-001_1108_web.pdf

El consumo de esta bomba es bastante grande lo cual hizo necesario el diseño del siguiente circuito de aislamiento y control de la bomba:

Figura 52 Circuito de aislamiento de la bomba.



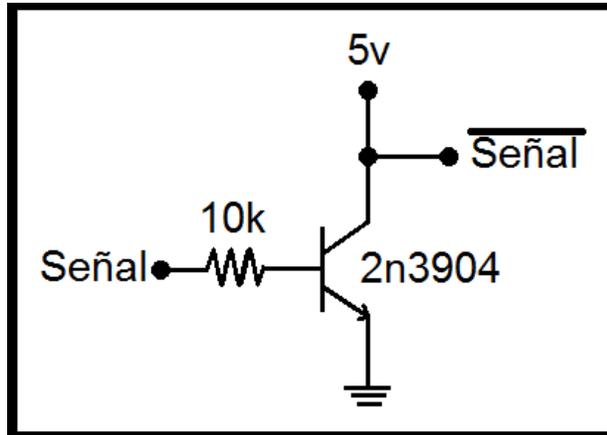
Fuente: Autores

6.4.2 Circuito de negación

Se diseñó un circuito que hiciera las veces de negadora de señal, debido a que la DAQ como estado inicial cada que vez que enciende pone en alto todas sus salidas digitales como un modo de protección. Esta condición hacia que la bomba

se activara una vez se alimentará la DAQ lo cual puede ser peligroso y poco útil. A continuación se muestra el circuito de negación:

Figura 53 Circuito negadora de señal.

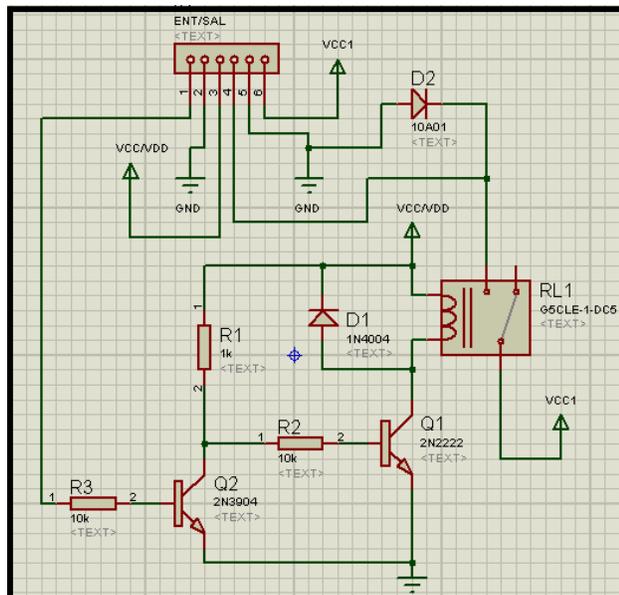


Fuente: Autores

6.4.3 Diseño de la tarjeta de control de la bomba

El circuito para el control de la bomba al igual que los demás se diseñó en PROTEUS isis. Este circuito consta de los dos circuitos anteriormente nombrados y de las salidas y entradas de señales, en la siguiente imagen se puede observar el circuito.

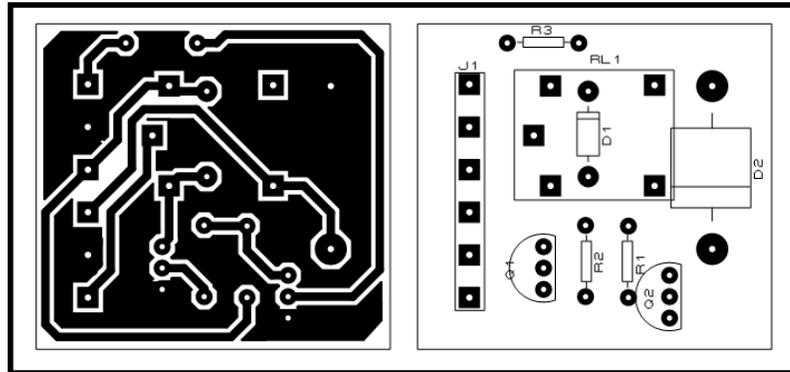
Figura 54 Circuito para control de la bomba.



Fuente: Autores

En la imagen 55 se puede ver el circuito impreso diseñado en PROTEUS ares:

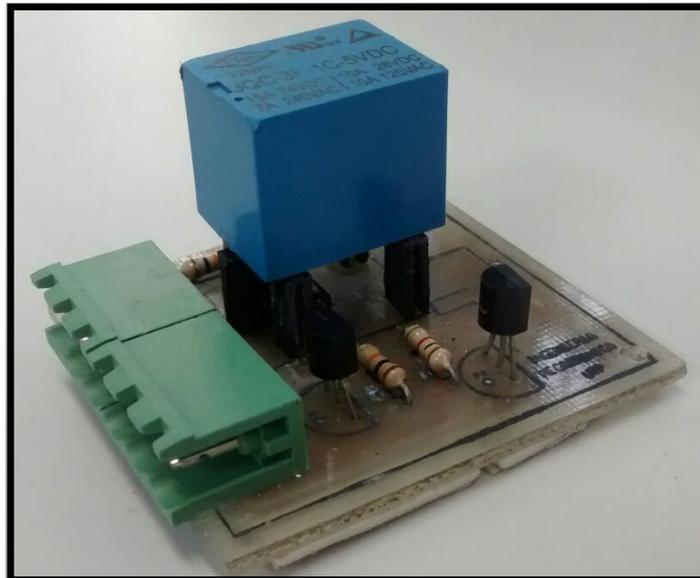
Figura 55 Circuito impreso control de la bomba.



Fuente: Autores

A continuación se puede observar la tarjeta para el control de la bomba ya terminada:

Figura 56 Tarjeta terminada control de la bomba.



Fuente: Autores

7. ADECUACION DE SEÑALES Y PROGRAMACION DEL CONTROL PID

La programación del control PID se realizara mediante la herramienta LabView y la adquisición de los datos se hará mediante la tarjeta DAQ NI-USB-6008. La tarjeta y el software en este caso van de la mano debido a que LabView tiene todas las librerías para manejar esta tarjeta, los dos son de National Instruments.

7.1 SOFTWARE DE PROGRAMACION LABVIEW

LabView (acrónimo de *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. 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 última versión es la 2012, con la increíble demostración de poderse usar simultáneamente para el diseño del *firmware* de un instrumento RF de última generación, a la programación de alto nivel del mismo instrumento, todo ello con código abierto.

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, comunicaciones, matemáticas, etc.

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.

Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs). Para los amantes de lo complejo, con LabView pueden crearse programas de miles de VIs (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, proyectos para combinar nuevos VIs con VIs ya creados, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación. El LabView 7.0 introduce un nuevo tipo de subVI llamado VIs Expreso (Express VIs). Estos son VIs interactivos que tienen una configuración de caja de diálogo que permite al usuario personalizar la

funcionalidad del VI Expreso. El VIs estándar son VIs modulares y personalizables mediante cableado y funciones que son elementos fundamentales de operación de LabView.

Presenta facilidades para el manejo de:

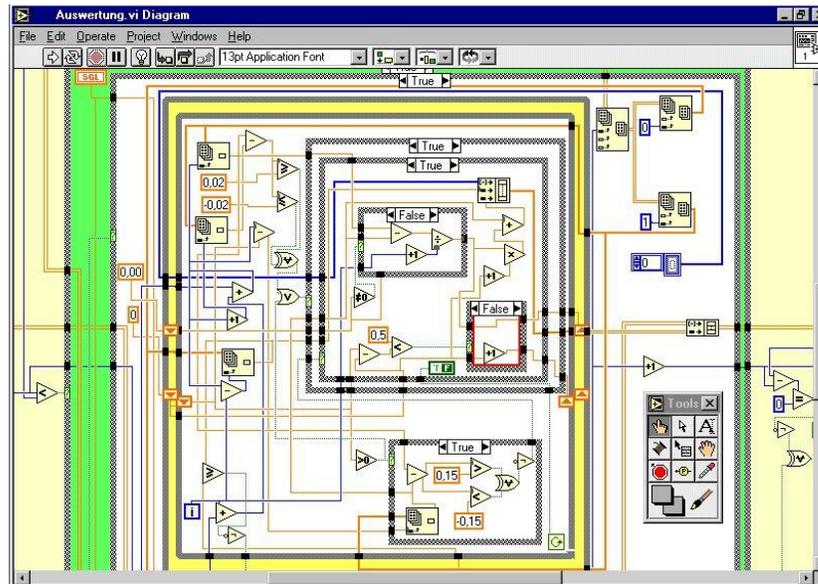
- Interfaces de comunicaciones:
 - Puerto serie
 - Puerto paralelo
 - GPIB
 - PXI
 - VXI
 - TCP/IP, UDP, DataSocket
 - Irda
 - Bluetooth
 - USB
 - OPC

- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones:
 - DLL: librerías de funciones
 - .NET
 - ActiveX
 - Multisim
 - Matlab/Simulink
 - AutoCAD, SolidWorks, etc.

- Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).
- Tiempo Real estrictamente hablando.
- Programación de FPGAs para control o validación.
- Sincronización entre dispositivos

Como se ha dicho es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan como se puede ver en la imagen 57, facilitando su comprensión. Al tener ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de estar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final.

Figura 57 Programa “Dibujado” en LabView.



Fuente: <http://www.ntecs.de/old-hp/uu9r/lang/html/labview.en.html>

7.2 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS NI-USB-6008

La tarjeta de adquisición de datos (NI-USB-6008) de *National Instruments* brinda funcionalidad de adquisición de datos básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderosa para aplicaciones de medida más sofisticadas.

Tabla 11 Tabla de características de la NI-USB-6008:

Formato Físico	USB
Número de Parte	779026-01
Sistema Operativo/Objetivo	Windows
Familia de Productos DAQ	Serie B
Tipos de Medida	Voltaje
Entrada Analógica	SI
Canales	4 , 8
Canales de una sola terminal	8
Canales Diferenciales	4
Resolución	14 bits
Velocidad de Muestreo	48 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango	138 mV

de Voltaje	
Rango de Voltaje Mínimo	-1 V , 1 V
Salida Analógica	SI
Canales	2
Resolución	12 bits
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	5 V
Rango de Voltaje Máximo	0 V , 5 V
Precisión Máx del Rango de V	7 mV

Fuente: National Instruments

Como se puede apreciar en la Tabla 11, se decidió por esta tarjeta de adquisición de datos, debido a la resolución de sus entradas y salidas analógicas, tenía la capacidad de estas indicadas para el sistema, otro factor importante fue el costo de dicha tarjeta, ofrecía una tasa de beneficio vs costo muy atractiva para el proyecto, en la imagen 58 se puede observar la forma física del componente.

Figura 58 Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008.



Fuente: National Instruments

7.3 ADQUISICION DE LA SEÑAL DEL CAUDALIMETRO

El sensor Rotoflow, de la marca *Gems Sensors*, cumple con todas las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 12.

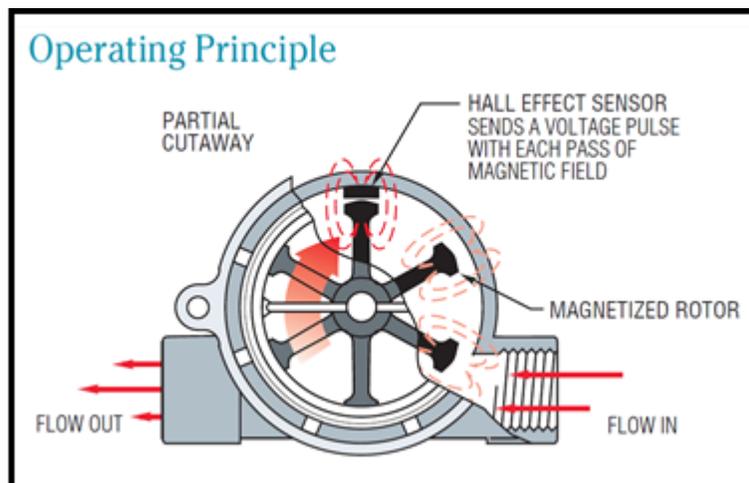
Tabla 12 Tabla de datos del sensor:

Materiales	Descripción
Cuerpo	Acero, Polipropileno hidrostáticamente estable, Vidrio reforzado
Pin Rotor	Cerámico
Rotor	Teflón
O-Ring	Vitan
Presiones de Operación	Descripción
Cuerpo de acero	200 PSIG a 82.2°C (temperatura del líquido)
Cuerpo de Polipropileno	100 PSIG a 82.2°C (temperatura del líquido)
Temperatura de Operación	Descripción
Cuerpo de Acero	100°C
Cuerpo de Polipropileno	90°C
Viscosidad Max	200SSU ⁷
Input	4.5 a 24 VDC / 12mA

Fuente: Gems Sensors

Para el sensor de caudal, se debe tener en cuenta que este envía un tren de pulsos, de periodo variable directamente proporcional al caudal de entrada a este, el funcionamiento se puede apreciar claramente en la imagen 59 donde se ve como el rotor, gira y cada vez que pasa por el imán genera un pulso. (Gems Sensors)

Figura 59 Principio de funcionamiento del caudalímetro.



Fuente: Gems Sensors

⁷Representa el tiempo en segundos para que un flujo de 60 centímetros cúbicos salga de un recipiente tubular por medio de un orificio, debidamente calibrado y dispuesto en el fondo del recipiente, el cual se ha mantenido a temperatura constante.

Por lo planteado se debe tener en cuenta que se tiene que trabajar por medio de un frecuencímetro y que la tarjeta de adquisición de datos va a recibir un tren de pulsos y no un voltaje análogo como tal. Por esta razón y viendo que la tarjeta cuenta en sus entradas con un contador, se optó por usar este como el puerto de entrada de la señal del caudalímetro.

En la siguiente tabla se puede observar las características de este puerto, el cual puede funcionar como un contador o un trigger, dependiendo de la configuración que se le dé.

Tabla 13 Características del contador:

Counter	
Number of counters	1
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting (falling-edge)
Counter direction	Count up
Pull-up resistor	4.7 kΩ to 5 V
Maximum input frequency	5 MHz
Minimum high pulse width	100 ns
Minimum low pulse width	100 ns
Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V

Fuente: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

Este contador tiene una frecuencia de entrada máxima de 5MHz, lo que lo hace bastante potente y más para nuestra aplicación que no supera los 40 Hz, en la tabla 14 se puede observar los valores típicos de frecuencia vs caudal de este sensor. En rojo se marca los valores para este modelo.

Tabla 14 Frecuencia vs caudal:

Frequency vs. Flow Rate-Typical						
Output Frequency – Hz						
RFO Model – Based on Port Size						
Flow Rate (GPM)	.25"	.25" with Adapter*	.50"	.50" with Adapter*	.75"	1"
0.10		13				
0.25		41				
0.50	15	90				
0.75		137				
1.0	34	186				
1.5	54			17		
2.0	73			25.9		
2.5	90			34		
3.0	110			43		
3.5	128					
4.0	148		34	60		
4.5	168					
5.0	185		44.8	76.7	24	
6.0			55	94		
7.0			65.9	111		
8.0			76	129		22
9.0			87.5	147		
10			99	165	61	30
11			110	185		
12			122	204		
13			135			
14			147			
15			158		93	43
16			170			
17			183			
18			195			
19			207			
20			220		128	60
25					163	74
30					196	91
35						107
40						123
45						137
50						153
55						170
60						185

*Low Flow Adapter

Fuente: <http://www.gemssensors.com/~media/GemsNA/NEW%20CATALOG%20FILES%20-%202013/RFO%20Type.pdf>

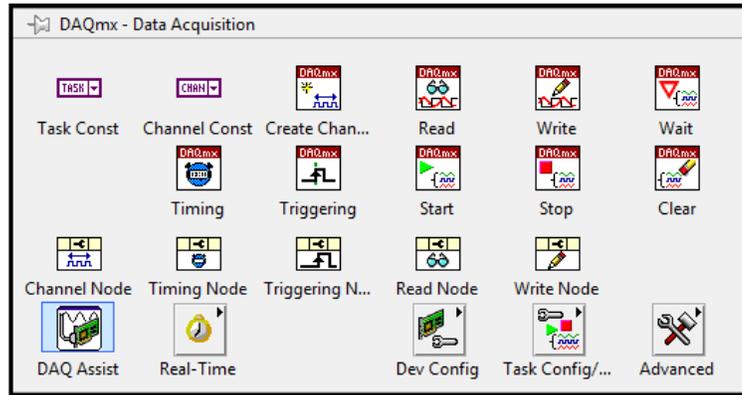
En la tabla se observa que el valor de frecuencia máximo que entrega el sensor es de 220Hz, pero teniendo en cuenta que no se va a medir un caudal tan alto hace que la frecuencia máxima sea mucho menor.

7.3.1 Conversor de número de pulsos a frecuencia

Hay que tener en cuenta que el sensor entrega una frecuencia la cual corresponde a un caudal y la tarjeta solo cuenta los pulsos. Por esta razón es necesario realizar un programa que cumpla con esta función de convertir número de pulsos a frecuencia.

En el programa LabView mediante el menú DAQmx (ver imagen 60) permite realizar la adquisición de datos. En este menú se pueden encontrar todas las opciones para la programación de la tarjeta NI-USB-6008.

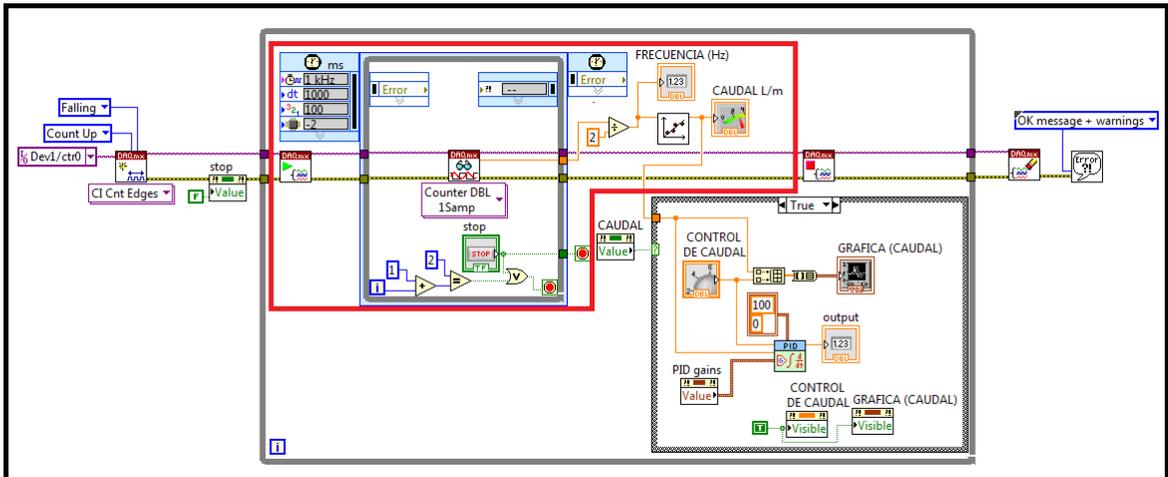
Figura 60 Menú DAQmx.



Fuente: Autores.

Para convertir este número de pulsos que se reciben del caudalímetro a frecuencia se hace necesario entender el concepto de frecuencia. La frecuencia es una cantidad de eventos por tiempo, para este caso sería una cantidad de pulsos por segundo. En la siguiente imagen se observa el programa realizado en LabView que cumple con esta función.

Figura 61 Programa LabView – conversión a Hz.



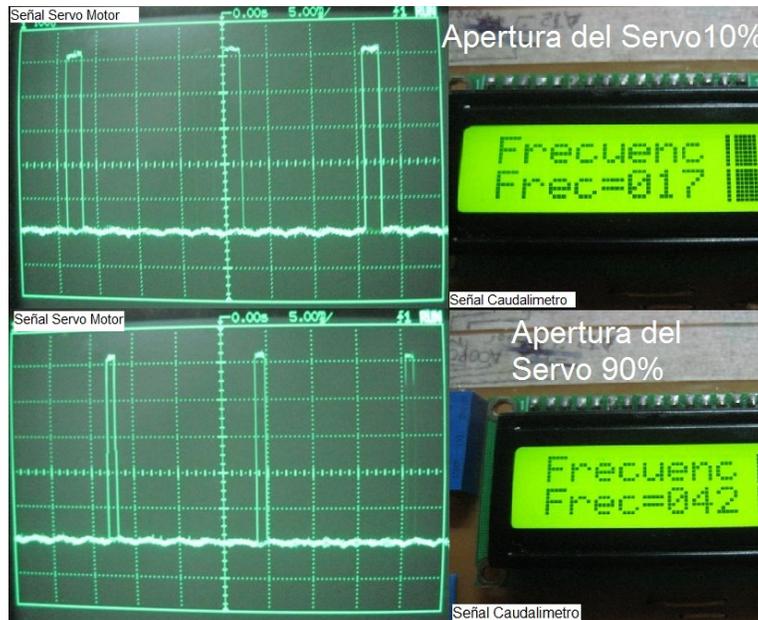
Fuente: Autores.

El programa encargado de esta función es el que se encuentra enmarcado en rojo. Este programa cuenta el número de pulsos que se entregan a la tarjeta cada determinado tiempo, en este caso se puso cada segundo y de esta manera convertir a Hz.

7.3.2 Caracterización del señor de caudal

Una vez se tienen los datos convertidos a Hz, se procede a caracterizar nuestro sensor. Para caracterizar este sensor se mide la frecuencia que entrega mediante un osciloscopio (ver imagen 62).

Figura 62 Medición de frecuencia con osciloscopio.



Fuente: José A. Ocampo, & LUIS H. Pulgarin, E. (2013). Diseño y construcción de una estación didáctica para control de caudal y nivel. Tesis. Colombia.

La caracterización se hizo mediante un cronómetro contabilizando el tiempo que se demorara en llenar el tanque dependiendo del % de apertura de la válvula y la frecuencia que entregaba el sensor. Para cada frecuencia se hicieron dos pruebas. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 15 Resultados a 10 Hz:

10 Hz		
Cantidad (L)	Tiempo prueba 1 (s)	Tiempo prueba 2 (s)
0,5 L	9,28	8,93
1L	9,18	9
1,5 L	9,18	8,28
2L	8,74	9,03
2,5L	9,51	8,76
3L	9,13	8,88
3,5L	8,8	8,54
4L	9,21	8,6
4,5L	9,58	9,01
5L	9,06	9,01
5,5L	9,68	8,12
6L	8,98	8,12
Tiempo total (s)	110,33	104,28

Fuente: Autores

Con el sensor entregando 10 Hz se demoró alrededor de 110 segundos en llenar 6 litros.

Tabla 16 Resultados a 15 Hz:

15 Hz		
Cantidad (L)	Tiempo prueba 1 (s)	Tiempo prueba 2 (s)
0,5 L	7,8	7,55
1L	7,88	8,12
1,5 L	7,34	7,39
2L	8,27	8,11
2,5L	7,24	7,78
3L	7,87	7,67
3,5L	7,87	7,71
4L	7,46	7,73
4,5L	7,87	8,26
5L	7,66	7,56
5,5L	8,08	7,61
6L	7,63	8,04
Tiempo total (s)	92,97	93,53

Fuente: Autores

Con el sensor entregando 15 Hz se demoró alrededor de 93 segundos en llenar 6 litros.

Tabla 17 Resultados a 20 Hz:

20 Hz		
Cantidad (L)	Tiempo prueba 1 (s)	Tiempo prueba 2 (s)
0,5 L	6,31	6,75
1L	6,6	6,63
1,5 L	5,65	5,68
2L	6,48	6,66
2,5L	6,21	6,03
3L	6,08	6,27
3,5L	6,7	6,21
4L	5,73	5,73
4,5L	6,57	6,6
5L	6,18	5,95
5,5L	6,44	6,24
6L	6,3	6,59
Tiempo total (s)		
	75,25	75,34

Fuente: Autores

Con el sensor entregando 20 Hz se demoró alrededor de 75 segundos en llenar 6 litros.

Tabla 18 Resultados a 28 Hz:

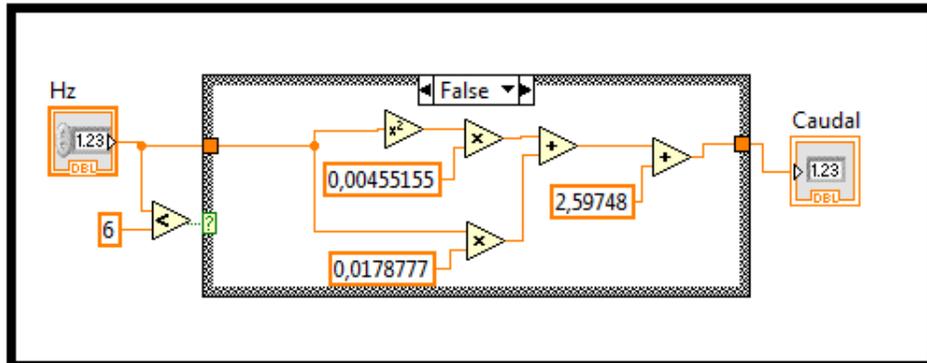
28 Hz		
Cantidad (L)	Tiempo prueba 1 (s)	Tiempo prueba 2 (s)
0,5 L	5	4,65
1L	4,78	4,5
1,5 L	4,89	4,14
2L	4,7	4,4
2,5L	5	4,41
3L	4,64	4,52
3,5L	4,67	4,4
4L	4,92	3,99
4,5L	4,85	4,71
5L	4,67	4,27
5,5L	4,16	4,27
6L	4,16	4,27
Tiempo total (s)		
	56,44	52,53

Fuente: Autores

Con el sensor entregando 28 Hz se demoró alrededor de 56 segundos en llenar 6 litros.

Una vez caracterizado el sensor se analizan los datos y se saca la curva característica del sensor para hallar la ecuación de conversión de Hz a caudal. En la siguiente imagen se muestra el circuito encargado de esta conversión:

Figura 63 Programa LabView – conversión Hz a caudal.



Fuente: Autores.

7.4 ADQUISICION DE LAS SEÑALES ANALOGAS

Las tres señales análogas provenientes de los dos sensores de nivel y del sensor de presión se conectaron a las entradas análogas de la tarjeta de adquisición de datos. Estas señales se conectaron a los siguientes pines de la DAQ:

Tabla 19 Conexión salidas análogas:

Salida Análoga	Puerto DAQ
Sensor de Nivel (Tanque 1)	AO 0
Sensor de Nivel (Tanque 2)	AO 1
Sensor de Presión	AO 2

Fuente: Autores.

A continuación se muestran las especificaciones de estas entradas análogas, Se puede observar las características, rangos de voltaje máximo y mínimo, resolución del convertor A/D y más.

Figura 64 Características de las entradas análogas de la DAQ.

Analog Input	
Converter type	Successive approximation
Analog inputs	8 single-ended, 4 differential, software selectable
Input resolution	
USB-6008	12 bits differential, 11 bits single-ended
USB-6009	14 bits differential, 13 bits single-ended
Max sampling rate ¹	
Single channel	
USB-6008	10 kS/s
USB-6009	48 kS/s
Multiple channels (aggregate)	
USB-6008	10 kS/s
USB-6009	42 kS/s
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Single-ended	±10 V
Differential	±20 V, ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V
Working voltage	±10 V
Input impedance	144 kΩ
Overvoltage protection	±35
Trigger source	Software or external digital trigger

Fuente: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

Como se muestra en los datos, esta tarjeta tiene muy buenas propiedades, la USB-6008 tiene una velocidad de muestreo de 10,000 muestras por segundo lo que es bastante bueno teniendo en cuenta que para nuestras mediciones no se necesita mucha velocidad ya que no cambian tan rápido en el tiempo. Esta tarjeta puede trabajar con señales análogas diferenciales o de una sola salida, para este caso se van a utilizar solo como señales análogas de una sola salida, para esta opción estas entradas tienen un rango de entrada de 10 a -10 voltios.

Hay que tener en cuenta los rangos de voltaje que se van a tener en las salidas análogas de nuestros sensores para saber si cumple con las capacidades de las entradas de la DAQ. Por ejemplo los rangos de voltaje de salida y características del sensor de presión son las siguientes:

Tabla 20 Características del sensor de presión MPX5100DP:

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾ Gauge, Differential: MPX5100D/MPX5100G/MPXV5100G Absolute: MPX5100A	P _{OP}	0 15	— —	100 115	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V _S	4.75	5.0	5.25	V _{DC}
Supply Current	I _O	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{OFF}	0.088	0.20	0.313	V _{DC}
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{FSO}	4.587	4.700	4.813	V _{DC}
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{FSS}	—	4.500	—	V _{DC}
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	±2.5	%V _{FSS}
Sensitivity	V/P	—	45	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t _R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I _{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}

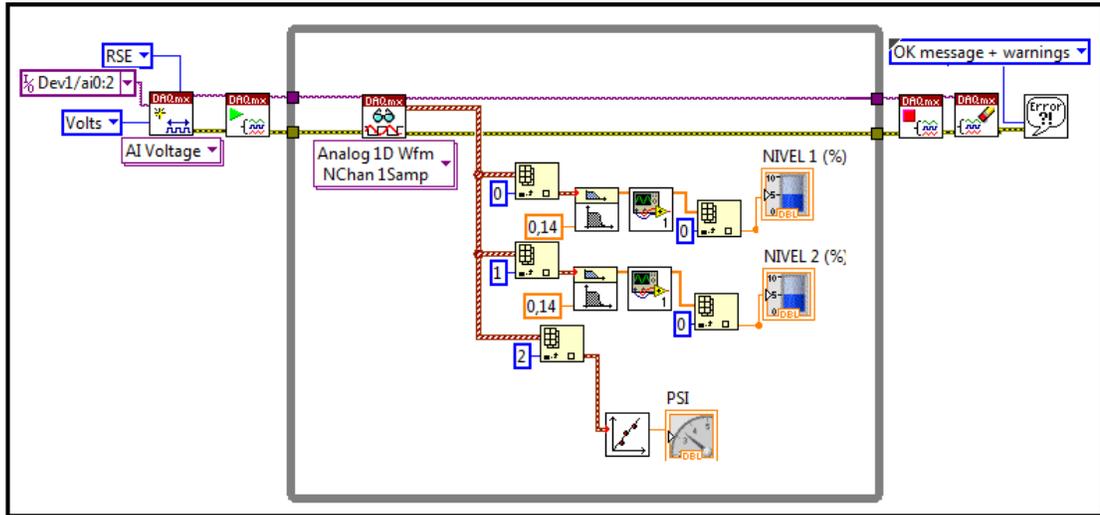
Fuente: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5100.pdf?pspll=1

En rojo se marcó las características de salida de este sensor, como se puede observar tiene un rango de salida típico de 0,2 a 4,7 voltios, teniendo en cuenta que este voltaje se normalizo de 0 a 5 voltios (ver capítulo 6.3.2) se puede decir que cumple fácilmente con las capacidades de los puertos análogos.

Los sensores de nivel al igual que el sensor de presión tienen salidas de voltaje de 0 a 5 voltios (ver capítulo 6.2.1) así que también cumplen con las capacidades de los puertos.

Una vez terminada las conexiones físicas se procede a realizar las adquisiciones de estas señales. La adquisición de las tres señales se hace simultáneamente mediante un solo bloque de tareas. En la imagen 65 se muestra este bloque y como después se separan las señales individualmente para ser tratadas por aparte dentro del programa.

Figura 65 Adquisición de las señales análogas.



Fuente: Autores.

7.5 PROGRAMACION DE LA SEÑAL DE CONTROL PARA LA VALVULA

El control de la abertura de la válvula proporcional se hace mediante una señal análoga de 0 a 5 voltios. Esta señal será enviada por la DAQ a través de una de sus salidas análogas, para entender mejor el funcionamiento de estas salidas en la siguiente imagen se muestran las características de estos puertos.

Figura 66 Características de las salidas análogas de la DAQ.

Analog Output	
Converter type.....	Successive approximation
Analog outputs	2
Output resolution.....	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range.....	0 to +5 V
Output impedance	50 Ω
Output current drive.....	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/μs
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale

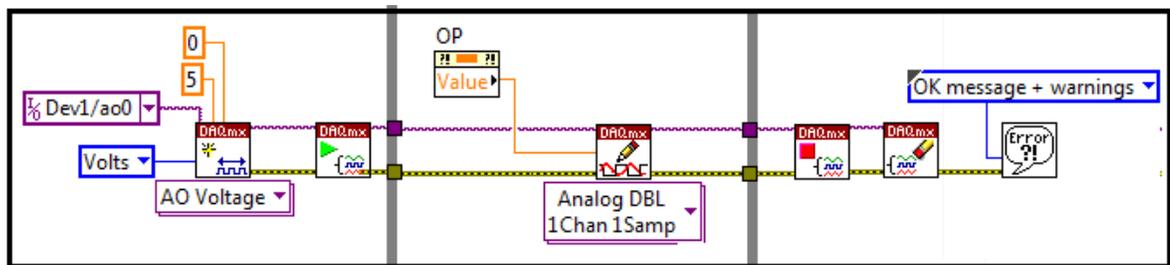
Fuente: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

Como se indica en la imagen estos puertos tienen un rango de salida de 0 a 5 voltios, lo cual es ideal para el control de nuestro servo el cual maneja una señal de control del mismo rango de voltaje.

Para programar las salidas análogas de la DAQ y así poder enviar el voltaje o en este caso la señal de control deseada, se debe al igual que para la adquisición de datos programar estos puertos y darles las tareas (“tasks”) necesarias mediante los bloques de programación de la DAQ.

En la imagen 67 se muestra el programa encargado de la adecuación de este puerto.

Figura 67 Programación de la salida análoga.



Fuente: Autores.

7.6 PROGRAMACION DE LA SEÑAL DE CONTROL PARA LA BOMBA

El control del encendido y apagado de la bomba se hace mediante una señal digital la cual activa las bobinas del relé que se encuentra en la tarjeta para el control de la bomba (ver capítulo 6.3). Esta señal será enviada por la DAQ a través de una de sus salidas digitales, para entender mejor el funcionamiento de estas salidas en la siguiente imagen se muestran las características de estos puertos.

Figura 68 Características de las salidas digitales de la DAQ.

Digital I/O			
Digital I/O			
P0.<0..7>	8 lines		
PL.<0..3>	4 lines		
Direction control.....	Each channel individually programmable as input or output		
Output driver type			
USB-6008	Open collector (open-drain)		
USB-6009	Each channel individually programmable as active drive (push-pull) or open collector (open-drain)		
Compatibility	TTL, LVTTTL, CMOS		
Absolute maximum voltage range	-0.5 to 5.8 V with respect to GND		
Pull-up resistor.....	4.7 kΩ to 5 V		
Power-on state	Input (high impedance)		
Digital logic levels			
Level	Min	Max	Units
Input low voltage	-0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	—	50	μA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8	V
Output high voltage			
Active drive (push-pull), I = -8.5mA	2.0	3.5	V
Open collector (open-drain), I = -0.6mA, nominal	2.0	5.0	V
Open collector (open-drain), I = -8.5mA, with external pull-up resistor	2.0	—	V

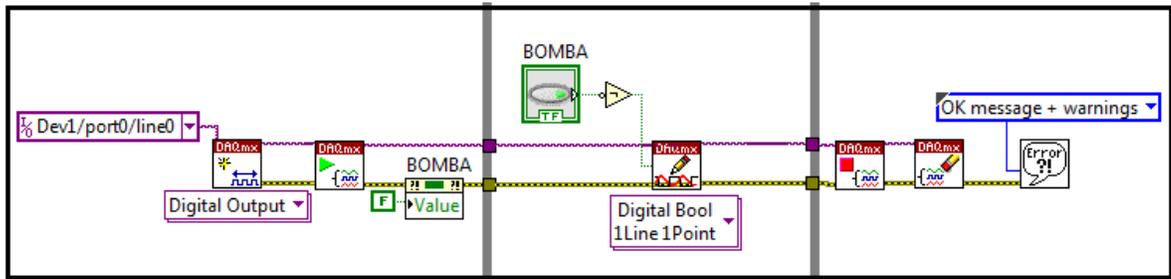
Fuente: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

Estas salidas digitales pueden entregar como máximo 8,5 mA por lo que hay que tener especial cuidado con la carga que se les desea poner. Para este caso esta señal conmutara un transistor el cual no va consumir más de 8,5 mA por lo que no presenta ningún problema.

Hay que aclarar que la alimentación del relé se hace mediante el voltaje +5 que entrega la DAQ la cual puede entregar hasta 200 mA, el relé no consume más de 50 mA así que no existe el riesgo de quemar el puerto o la DAQ como tal.

Para programar las salidas digitales de la DAQ y así poder enviar el voltaje o en este caso la señal de control deseada, se debe al igual que para la adquisición de datos programar estos puertos y darles las tareas (“tasks”) necesarias mediante los bloques de programación de la DAQ. En la siguiente imagen se muestra el programa encargado de la adecuación del puerto y de controlar este.

Figura 69 Programación de la salida digital.

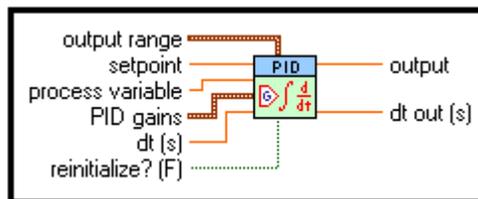


Fuente: Autores.

7.7 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PID

Una vez se tienen todas las señales de control adquiridas provenientes de nuestros sensores y los actuadores apropiadamente conectados se procede a la programación del controlador. Para este caso se va utilizar un controlador PID el cual se debe sintonizar y así realizar un control adecuado de las variables. El programa LabView no viene con el toolkit de control PID, el cual es necesario para poder tomar las herramientas que este tiene y hacer un control mucho más versátil y fácil de implementar. El toolkit “*LabView PID and Fuzzy Logic Toolkit*” se debe descargar e instalar correctamente para poder hacer uso de sus herramientas, en la siguiente imagen se muestra el bloque PID con sus especificaciones de entradas y salidas:

Figura 70 Bloque PID.



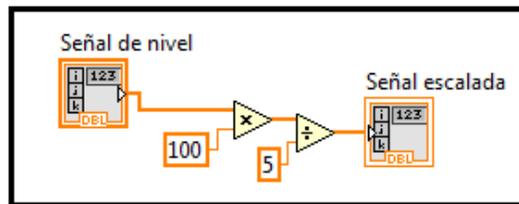
Fuente: Autores.

A este bloque vienen conectadas las variables de proceso, las referencias y ganancias. Para obtener un control adecuado hay que prestar atención a las escalas que se manejan ya que dependiendo de estas se obtendrá una salida que sea correspondiente a la aplicación. Para cada variable a controlar se programó un controlador individualmente y así garantizar unos rangos de operación adecuados.

7.7.1 Programa PID para el control de nivel

El nivel en los tanques va a manejar una escala del 0 a 100%, siendo 0 el valor mínimo y 100 el valor máximo de nivel, por lo que se hace necesario un escalamiento de la señal que entregan los sensores de nivel. En la imagen 71 se muestra el programa con el que se hace el escalamiento de la señal de nivel para garantizar un rango de 0 a 100.

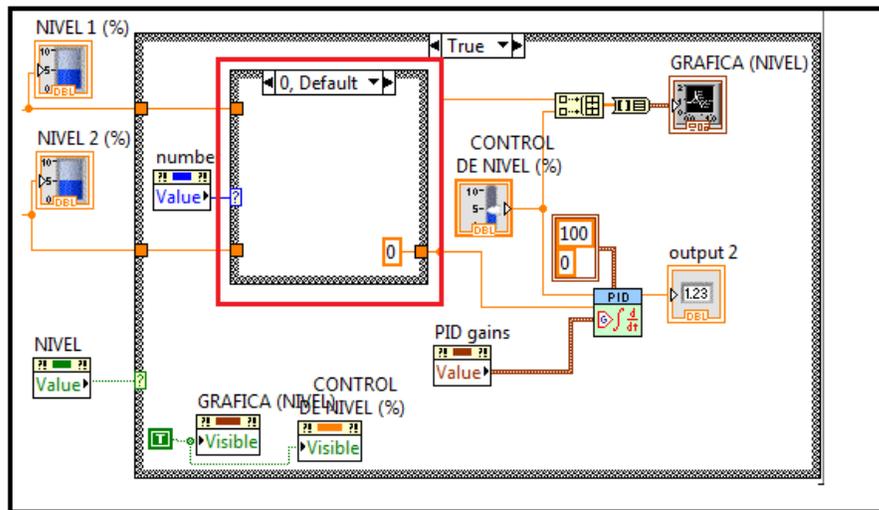
Figura 71 Escalamiento de la señal de nivel.



Fuente: Autores.

Una vez se tienen las escalas adecuadas; y todas las variables y referencias listas, se conectan al bloque PID para terminar con la adecuación del controlador PID. A continuación se muestra la programación del controlador de nivel PID ya terminada.

Figura 72 Programación PID para control de nivel.



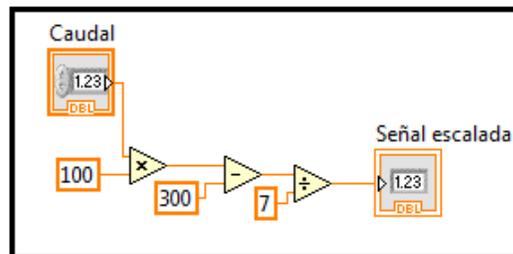
Fuente: Autores.

Hay que tener en cuenta que como son dos opciones de control de nivel, una para el primer tanque y otra para el segundo tanque se debe realizar una especie de multiplexor encargado de elegir la variable que se desea controlar dependiendo de la aplicación seleccionada por el usuario. En la imagen anterior se encuentra enmarcado en rojo este "multiplexor".

7.7.2 Programa PID para el control de caudal

Al igual que con la señal del sensor de nivel, la señal del sensor de caudal se debe escalar para que corresponda con los rangos deseados. Para este caso el caudal tendrá un rango de control de 3 a 10 L/m, siendo 3 el valor mínimo y 10 el valor máximo al que se puede controlar el caudal en el sistema (para entender mejor el porqué de este rango ver el capítulo 7.3). Para que corresponda el los rangos de la variable de proceso y el de referencia con la salida se debe escalar estas señales de igual forma que con el sensor de nivel. En la imagen 73 se muestra el programa con el que se hace el escalamiento de la señal de caudal.

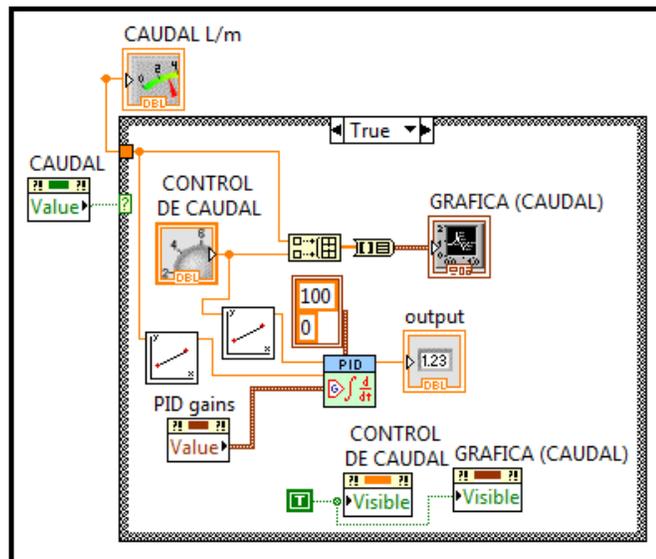
Figura 73 Escalamiento de la señal de caudal.



Fuente: Autores.

Una vez se tienen las escalas adecuadas; y todas las variables y referencias listas, se conectan al bloque PID para terminar con la adecuación del controlador PID. A continuación se muestra la programación del controlador de caudal PID ya terminada.

Figura 74 Programación PID para control de caudal.



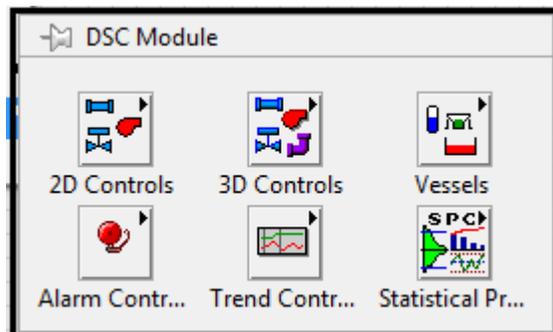
Fuente: Autores.

8. DISEÑO DE LA PANTALLA HMI EN LABVIEW

El diseño de la pantalla HMI se realizó en el programa LabView mediante un módulo de diseño y simulación gráfico. Este módulo llamado *Datalogging and Supervisory Control (DSC)* es el complemento de LabView, ideal para desarrollar HMI/SCADA. Con LabView DSC, se puede desarrollar de manera interactiva un sistema de monitoreo y control distribuido que va desde docenas hasta decenas de miles de etiquetas. Incluye herramientas para registrar datos a una base de datos histórica en red, rastrear tendencias de datos históricos y en tiempo real, administrar alarmas y eventos, crear redes de objetivos LabView Real-Time y dispositivos OPC en un sistema completo y añadir seguridad a interfaces de usuarios. (National Instruments)

Este módulo tiene lo necesario para desarrollar una pantalla tipo SCADA del sistema. En él se encuentran gráficos de todo tipo, como válvulas, tuberías, tanques, bombas etc. En la siguiente imagen se pueden observar algunas de las opciones que tiene este módulo para implementar simulaciones de elementos.

Figura 75 Opciones del módulo DSC.



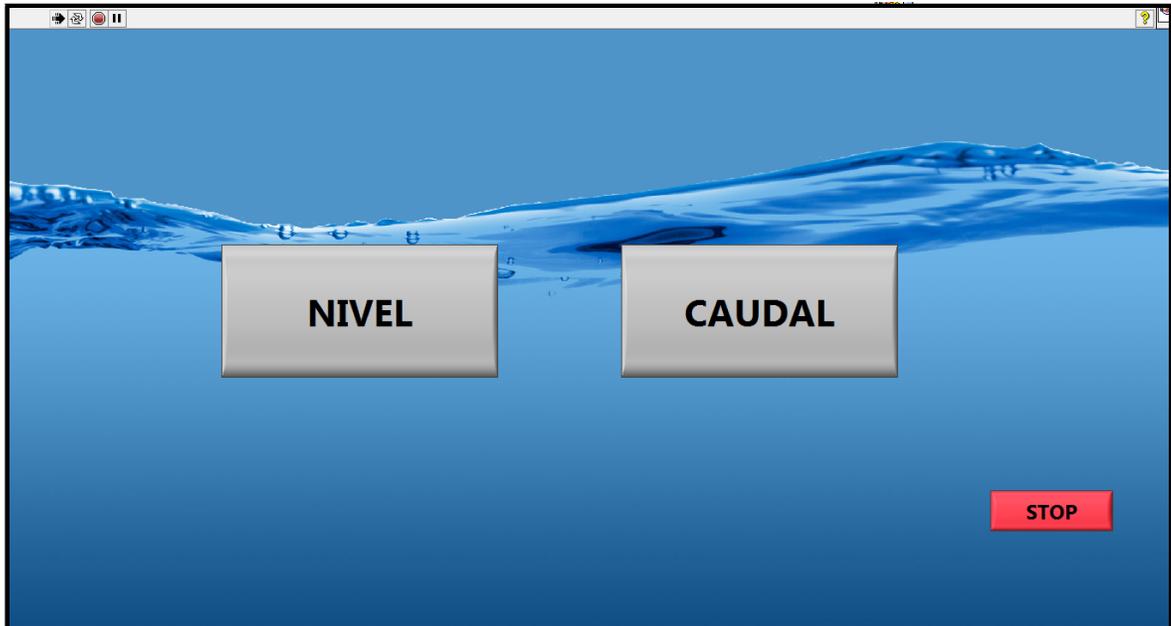
Fuente: Autores.

Una vez instalado el modulo se procedió a el diseño de las pantallas para cada opción de control y del menú principal.

8.1 DISEÑO DE LA PANTALLA DE MENU

En la pantalla de menú es donde se encuentran las opciones de control que maneja la estación. En ella se puede seleccionar que se desea controlar, ya sea control de nivel o control de caudal. En la imagen 76 se observa la pantalla de menú con las opciones de control.

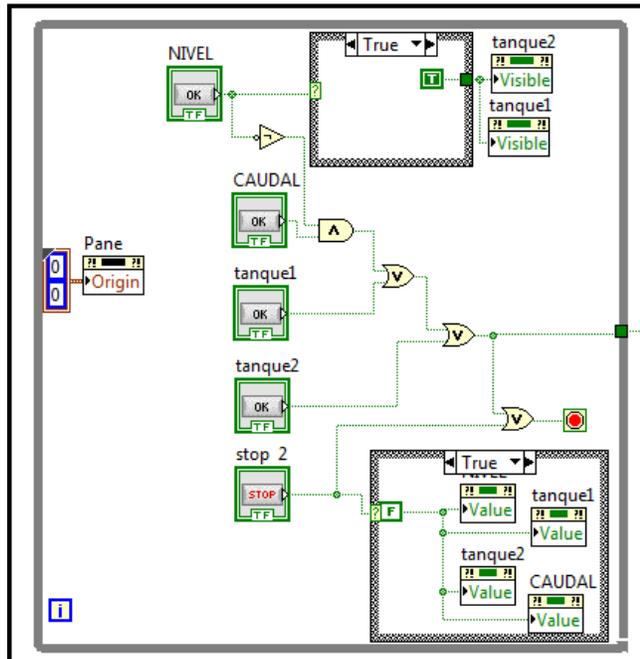
Figura 76 Pantalla de menú.



Fuente: Autores

Esta pantalla va controlada por una programación en el diagrama de bloques (ver imagen 77). En esta se programan los botones booleanos y se generan las acciones de acuerdo a la opción elegida.

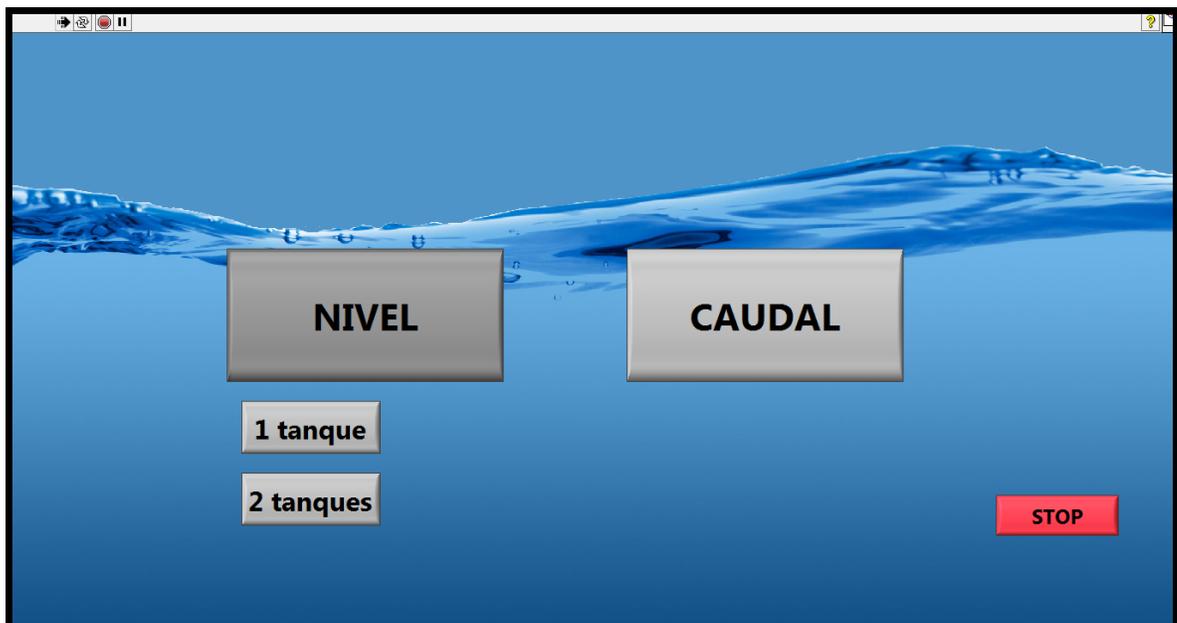
Figura 77 Programa encargado de la pantalla de menú.



Fuente: Autores

Si la opción elegida es la de nivel se abre un submenú en el cual se puede elegir si se desea hacer control en un tanque o en dos. En la imagen 78 se puede observar este submenú.

Figura 78 Submenú.

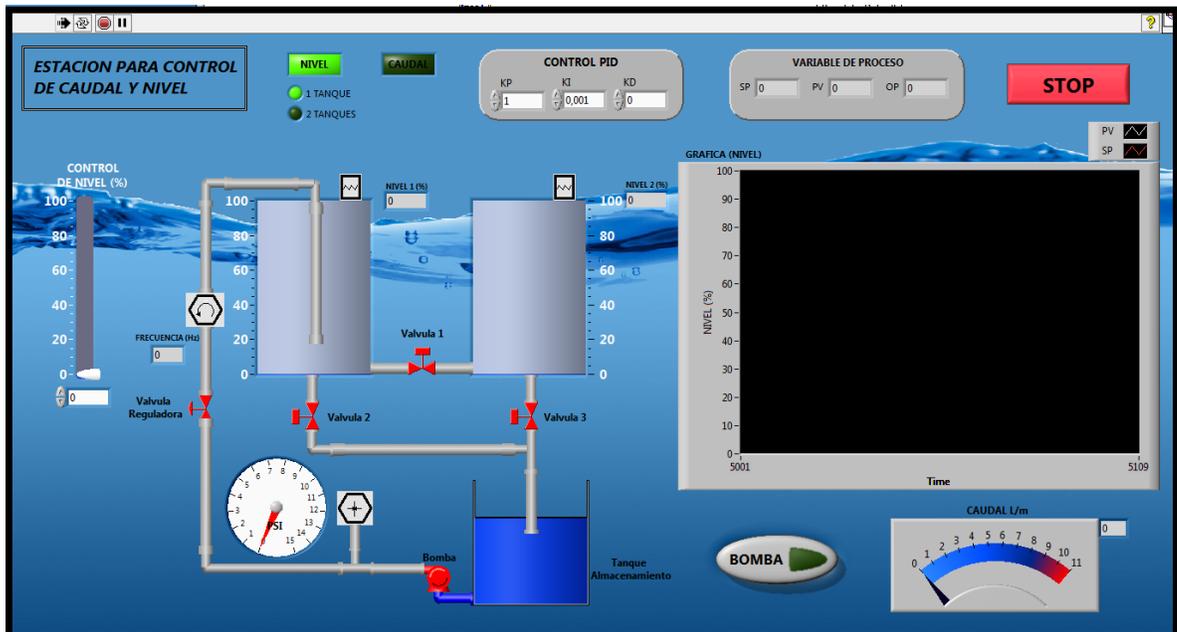


Fuente: Autores

8.2 DISEÑO DE LA PANTALLA DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL

En esta pantalla es donde se encuentra todo el sistema SCADA. En ella se simulan los tanques, la bomba, los flujos de agua en las tuberías y las válvulas. También se muestran los niveles de los tanques, el caudal y la presión en el sistema en tiempo real. Los controles, indicadores y graficas de señales también se muestran en esta pantalla (ver imagen 79).

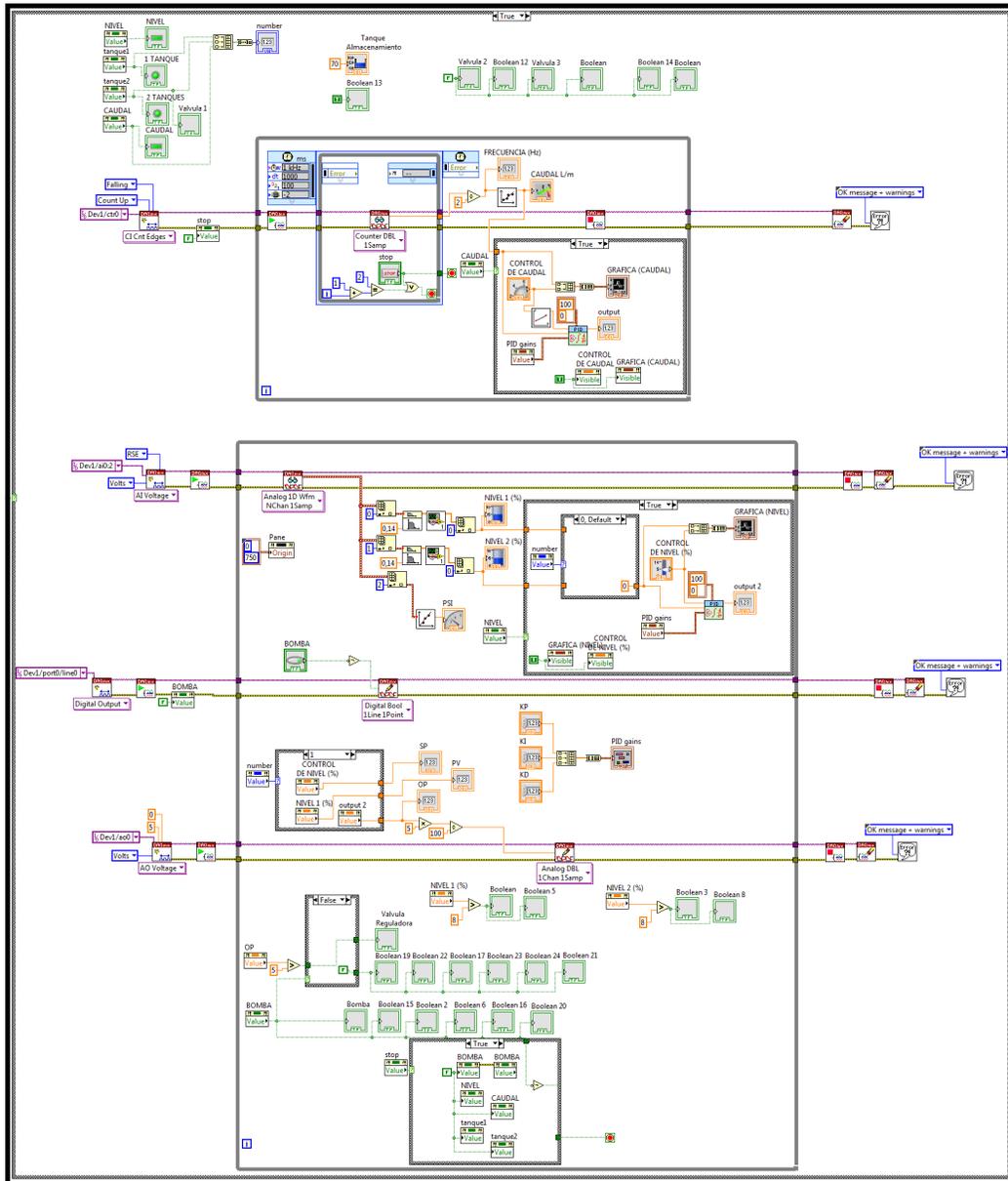
Figura 79 Pantalla principal.



Fuente: Autores

Para la simulación de cada elemento se hizo necesaria una programación en el diagrama de bloques. Cada pieza funciona como un indicador booleano y se activa con un "true", a continuación en la siguiente imagen se muestra el programa completo con todos sus componentes de control, adquisición y programación del sistema completo.

Figura 80 Programa encargado de la pantalla principal y demás funciones



Fuente: Autores

9. DISEÑO DE LA CAJA DE CONTROL Y CABLEADO

9.1 DISEÑO DE LA CAJA DE CONTROL

La caja de control es el lugar donde van los bornes, la tarjeta de adquisición y la fuente de control. A esta caja llegan todos los cables de los sensores y actuadores para luego ser distribuidos en la bornera.

Para la caja de control se compró una caja eléctrica prediseñada (ver imagen 81) de 30x30 la cual luego se modificó de acuerdo a las necesidades.

Figura 81 Caja electrica prediseñada de 30x30.



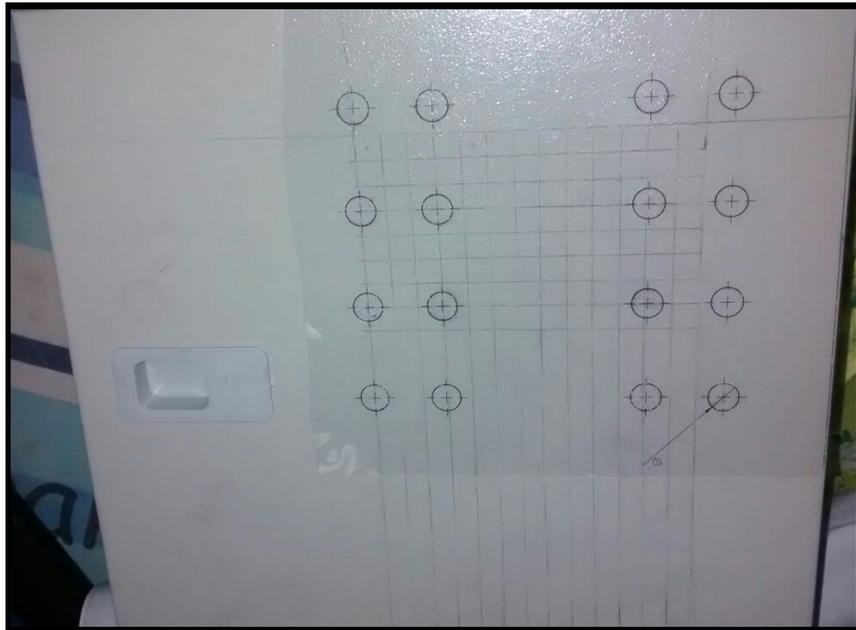
Fuente: Autores.

9.1.1 Adecuación de la caja prediseñada

A esta caja se le debió realizar varios cambios para poder cumplir con las necesidades que se tenían. A continuación se listan algunos de estos cambios.

- **Perforaciones:**
Se le debieron realizar las perforaciones necesarias para el borne tipo banana, la alimentación AC, la entrada de los cables, el accionamiento, el piloto y la entrada USB de la DAQ. Estas perforaciones se mandaron a hacer en un taller de mecanizado, en la siguiente imagen se muestra como se marcaron los orificios mediante planos en SolidWorks.

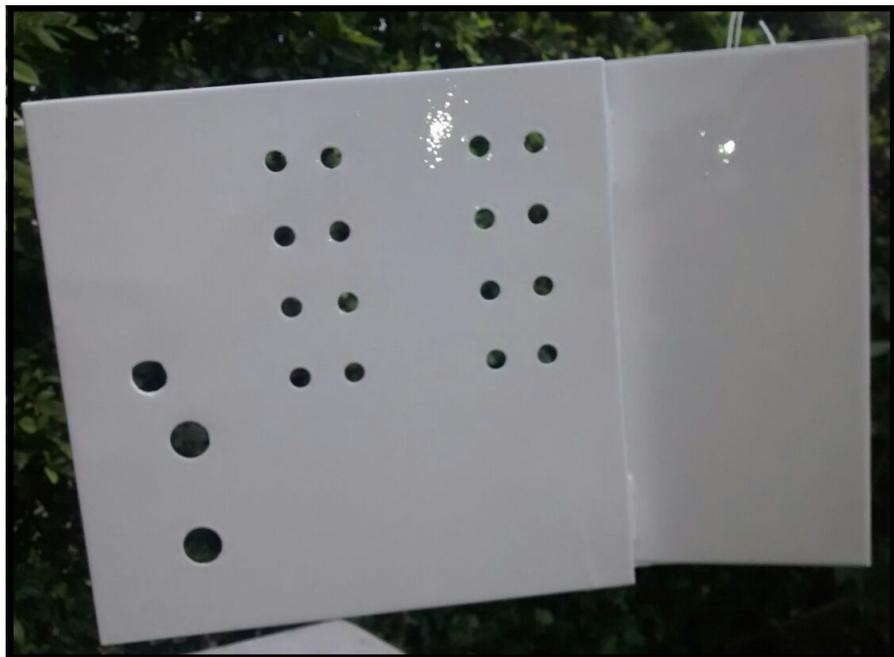
Figura 82 Croquis de los orificios.



Fuente: Autores.

- **Pintura:**
Para darle un mejor aspecto se enmasillo los huecos prefabricados que vienen en la caja y se pintó de color blanco.

Figura 83 Caja pintada.



Fuente: Autores

- **Chapa:**
Esta caja no viene con una chapa, así que se le adecuo una para darle mayor seguridad, en la siguiente imagen se puede observar la chapa que se le adapto.
- **Doble fondo:**
Se le adapto un doble fondo con el fin de facilitar las conexiones internas de cableado y para darle un mejor aspecto, ya que así se evita perforar la lámina de la caja.

En la siguiente imagen se observa la caja una vez terminadas las reformas y adecuaciones

Figura 84 Caja de control terminada.



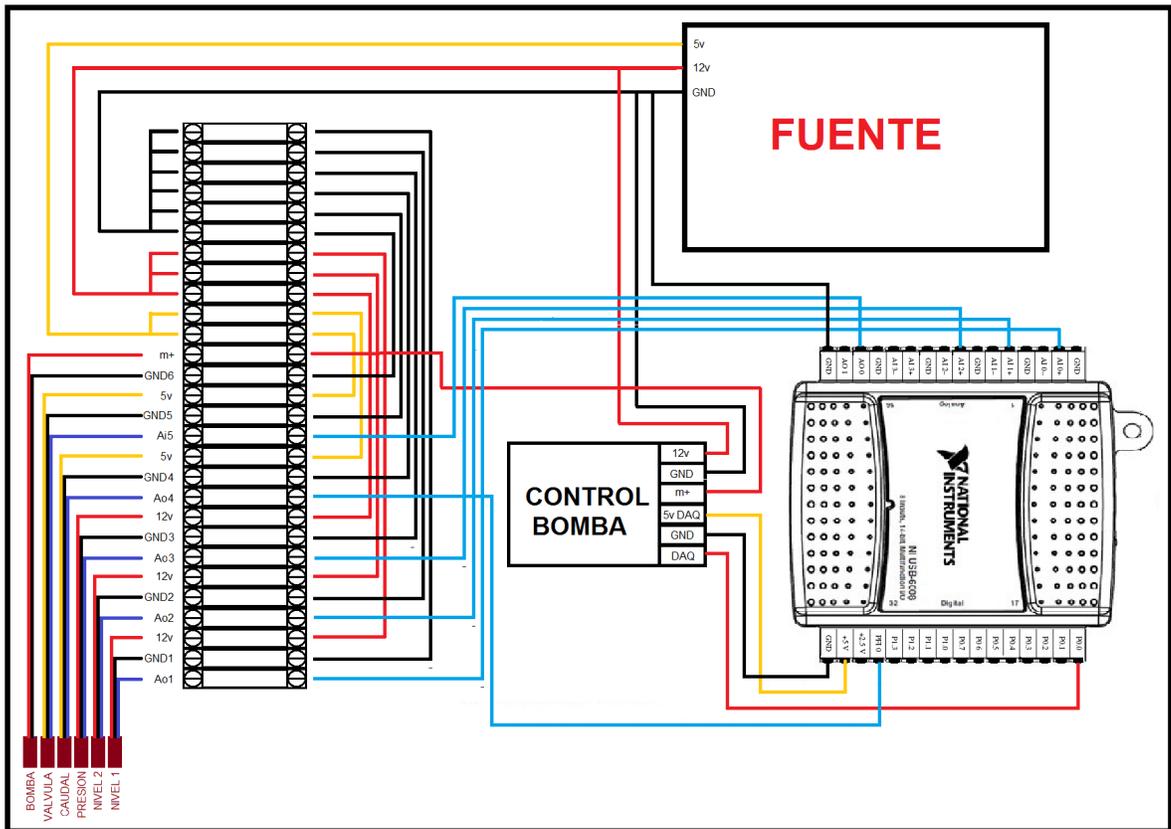
Fuente: Autores.

9.1.2 Distribución y cableado interno

Adentro de la caja se encuentra la bornera que recibe todos los cables de sensores y actuadores que después son distribuidos a los puntos de alimentación o a las tarjetas de control.

Antes de cualquier cableado lo primero que se hizo fue un plano de cómo se desea distribuir y estructurar las conexiones. En la siguiente imagen se muestra este diagrama el cual fue realizado en paint.

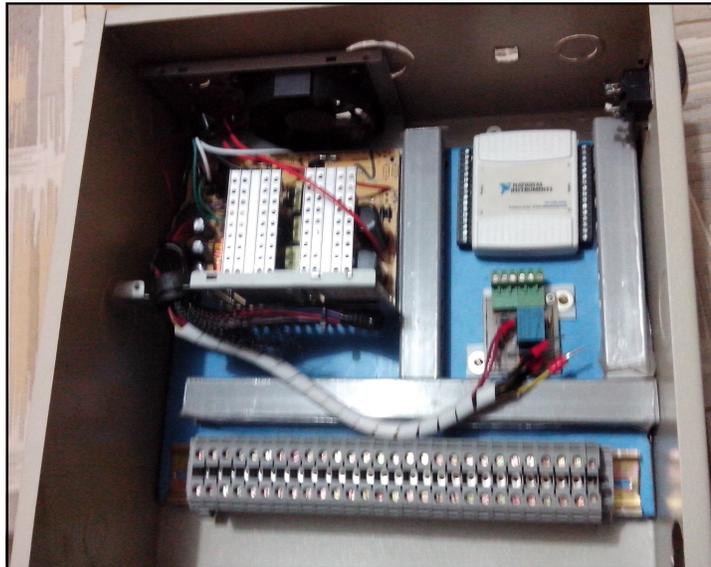
Figura 85 Diagrama de cableado interno.



Fuente: Autores.

Una vez listo el diagrama de conexión se procedió al cableado y a la distribución de las borneras, fuente y tarjetas. Lo primero que se realizó fue la distribución de los elementos, en la imagen 87 se muestra como quedaron distribuidos en la caja.

Figura 86 Distribucion de los elementos dentro de la caja.



Fuente: Autores.

Después de la distribución de la fuente, DAQ, tarjeta de control de la bomba, canaletas y borneras se procedió al cableado. El cableado se realizó con cable vehicular AWG #18, a continuación se muestra el sistema ya cableado.

Figura 87 Cableado dentro de la caja.



Fuente: Autores.

9.1.3 Inconvenientes y soluciones del cableado

Una vez listo el cableado se procedió a alimentar la estación para hacer pruebas y ver que inconvenientes se presentaban. Debido a que en las señales se producía un ruido enorme que distorsionaba completamente las señales de los sensores y hacia prácticamente imposible algún control, se buscaron soluciones de todo tipo. Lo primero que se revisó fueron las conexiones y posibles cables mal ajustados. Esto no soluciono nada y se decidió por colocar filtros en las señales y aun así se generaba mucho ruido. Debido a este inconveniente la única solución fue desarmar todo lo que se tenía y probar parte por parte hasta hallar algún indicio de lo que generaba este ruido.

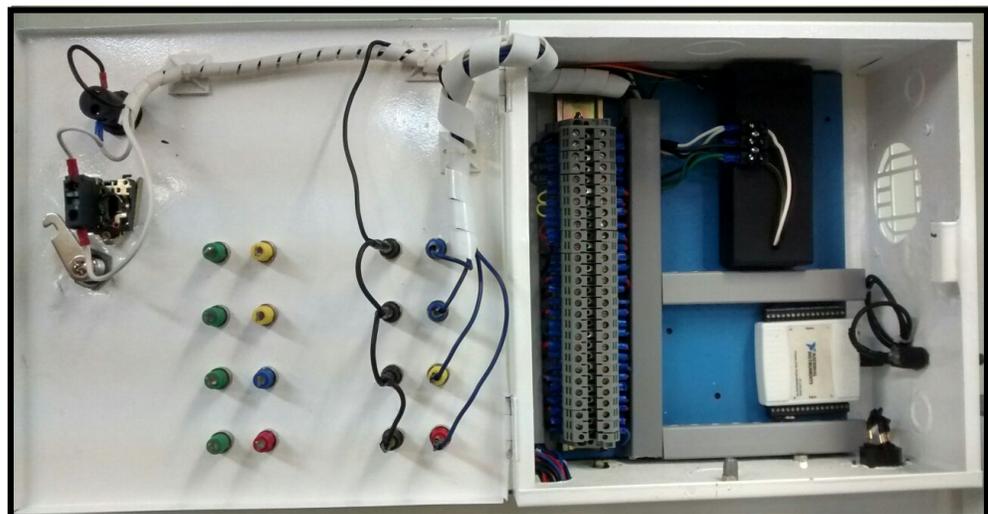
- **Inconveniente:**

Después de buscar y probar parte por parte para hallar algún problema que generara este ruido, se encontró que la posible fuente de ruido era justamente la fuente de alimentación. Todas las señales de alimentación de los sensores y de la tarjeta de control se alimentaban de la misma fuente encargada de alimentar la bomba de potencia y teniendo en cuenta que esta bomba tiene un consumo bastante alto cercano a los 14 amperios se hizo bastante probable que este ruido se generara allí por un campo electromagnético.

- **Solución:**

Se debieron utilizar dos fuentes y aislarlas completamente una de la otra. La primera fuente se encargaría de la alimentación de control, es decir de los sensores y tarjetas de control. Esta se ubicó dentro de la caja de control como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 88 Fuente para alimentacion de sensores.



Fuente: Autores.

La segunda fuente se encargaría solamente de la alimentación de la bomba, esta fuente quedaría aislada completamente de la caja de control por lo que se debió adecuar un espacio para ella. Para esta fuente se compró una caja eléctrica prediseñada de 20x20 a la cual también se le efectuaron algunos cambios y se pintó para darle un mejor aspecto. En la siguiente imagen se muestra la caja de potencia.

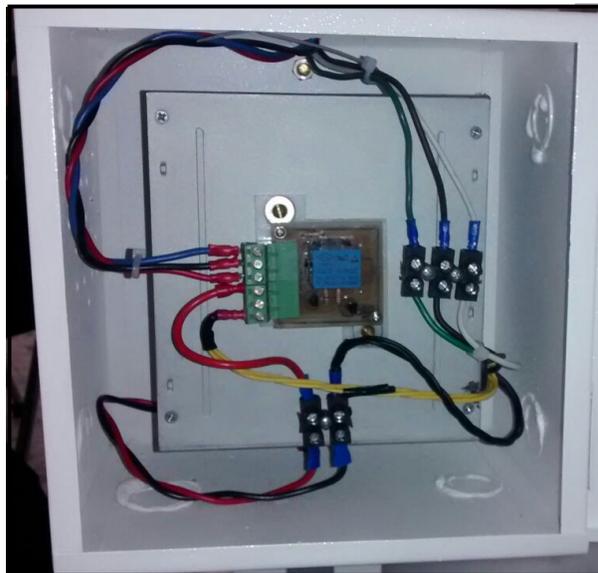
Figura 89 Caja 20x20 para fuente de potencia.



Fuente: Autores.

En esta caja se situaron la fuente de potencia y la tarjeta de control de la bomba, en la siguiente imagen se muestra como se acomodaron y se cablearon.

Figura 90 Distribucion de la caja de potencia.

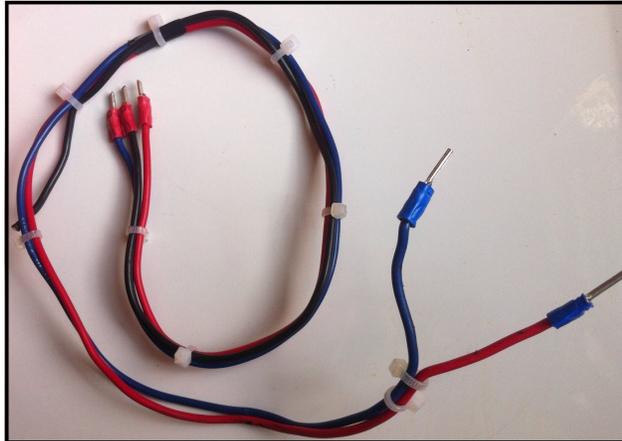


Fuente: Autores.

9.2 CABLEADO EXTERNO

Tanto para la alimentación como para el transporte de señales de cada uno de los sensores y actuadores se utilizó cable AWG #18 (ver imagen 92) que resultó ser un buen calibre para soportar los requerimientos de cada uno de los componentes eléctricos y electrónicos de la estación.

Figura 91 Cables usados para conexiones.



Fuente: Autores.

A la hora de elegir los terminales que iban a ser utilizados en el proyecto se optó por colocar terminales de tipo aguja (ver imagen 93) que permiten una fácil conexión y dan un buen aspecto al cableado. Se utilizaron pines de color azul para la conexión en la bornera de distribución ya que su tamaño mediano encaja perfectamente en las borneras y de color rojo que son más pequeños para la conexión en las borneras de los sensores.

Figura 92 Pines usados para terminales de cableado.



Fuente:<http://www.o-digital.com/uploads/2179/2198-1/InsulatedPinTerminalsNonInsulatedPinTerminals901.jpg>

Para la elaboración del cableado en el exterior de la estación se utilizó canaleta ranurada de 25X25 mm con el fin de presentar una estación impecable con la mejor presentación posible. Se realizó el cubrimiento del cable con la canaleta alrededor de toda la estructura lo cual simplifica la forma de llegar a todos los rincones de la estación. En la siguiente imagen se muestra como quedó el cableado exterior de la estación.

Figura 93 Cableado externo.



Fuente: Autores.

Finalmente en la siguiente imagen se muestra como quedó la estación con todo el montaje ya listo. Sensores, actuadores, cajas de control y potencia.

Figura 94 Estacion didactica terminada.



Fuente: Autores.

10. PRESUPUESTO

Tabla 21 Presupuesto:

DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
Microcontroladores	44.000
Servomotor y válvula proporcional	80.000
Sensores de ultrasonido	16.000
Válvula de retorno	150.000
Tubería PVC y acoples	15.000
Manómetro	15.000
Componentes electrónicos	65.000
Riel omega, canaleta y borneras	90.000
Borneras	30.000
Caja eléctrica de señales	140.000
Caja eléctrica arranque de bomba	25.000
Mano de obra	3.500.000
TOTAL:	4.170.000

Fuente: Autores

CONCLUSIONES

- Se caracterizaron los sensores de caudal, nivel y presión, con esto se obtuvieron los datos de funcionamiento del sistema para su posterior montaje y puesta a punto.
- Se cambió el diseño de la tarjeta principal por una realizada por módulos los cuales van dirigidos hacia la tarjeta de adquisición de datos, además se aisló en una caja aparte el encendido de la bomba y la fuente con la que trabaja para así evitar perturbaciones en el sistema
- se realizaron modificaciones al sistema físico para acondicionar nuevos componentes como el cambio de sensores de presión a sensores de ultrasonido ya que los primeros no tenían una escala adecuada para la función que se encontraban desarrollando, también se agregó una válvula reguladora de presión que permite que la bomba retorne el líquido al tanque principal cuando la válvula proporcional se encuentra totalmente cerrada y cuyo objetivo es proteger la bomba para que esta no trabaje en seco y se pueda ver afectado su correcto funcionamiento.
- Se realizó una interfaz para la cual se utilizó el software de LabView el cual permitió una comunicación fácil entre la tarjeta de adquisición de datos y el programa elaborado en tiempo real. Todas las señales de las variables físicas pudieron ser visualizadas en la pantalla del computador y algunas de ellas manipuladas por medio del mismo para realizar labores de control y toma de datos.

RECOMENDACIONES

- Mejorar los sistemas de filtrado de las señales tanto físicas como de programación a través de la tarjeta de adquisición de datos.
- Cambiar el transmisor de flujo por uno que posea una resolución más adecuada para el caudal que pasa por el sistema.
- Mejorar el arranque de la motobomba adicionando un relé industrial que este diseñado para resistir el funcionamiento continuo que se le puede dar, al igual que mejorar la tarjeta que proporciona el arranque de la motobomba por una que tenga pistas más gruesas.
- Adicionar una nueva válvula proporcional reemplazando la válvula de alivio para poder controlar la misma dentro del sistema.
- Crear un sistema de medición y control de temperatura para tener una mayor gama de posibilidades dentro del sistema.
- Implementar una pantalla HDMI sobre la estación didáctica, para tener una mejor visualización de los procesos de control.
- Realizar las guías de laboratorio para mejorar la experiencia en este dispositivo.
- Adicionar un sistema de medición de flujo por platina de orificio, esto con el fin de que la estación de mayores prestaciones.

BIBLIOGRAFIA

- Carlos A. Smith, A. B. (2000). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. Limusa.
- FESTO*. (n.d.). Retrieved Noviembre 14, 2015, from www.festo-didactic.com
- freescale*. (n.d.). Retrieved Octubre 24, 2015, from www.cache.freescale.com
- Gems Sensors*. (n.d.). Retrieved Octubre 25, 2015, from www.gemssensors.com
- Gene F. Franklin, J. D.-N. (1991). *Feedback Control of Dynamic Systems* (2 ed.). Addison-Wesley.
- Jose A. Ocampo, L. H. (2013). Diseño y construcción de una estación didáctica para control de caudal y nivel. *Tesis*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Lucas Nuelle*. (n.d.). Retrieved Noviembre 13, 2015, from www.lucas-nuelle.es
- National Instruments*. (n.d.). Retrieved Octubre 25, 2015, from www.ni.com
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna* (illustrated ed.). Pearson Educación.
- Servodatabase*. (n.d.). Retrieved Octubre 20, 2015, from www.servodatabase.com
- Waynepumps*. (n.d.). Retrieved Octubre 20, 2015, from www.waynepumps.com

ANEXOS

ANEXO A: Código de programación del microcontrolador ATmega328 para el sensor de nivel.

```
/*
Programa para sensar nivel con el sensor de ultrasonido HC-SR04 usando interrupciones

Las interrupciones del timer 1 son usadas para enviar el pulso de
trigger del sensor en el momento indicado.

La duración de la señal de eco del sensor es medida al generar una
Interrupción externa cada vez que la señal de echo cambie de estado.

Este sketch usa la librería del TimerOne, se puede descargar de acá:
http://code.google.com/p/arduino-timerone/downloads/detail?name=TimerOne-
v9.zip&can=2&q=
*/

#include <TimerOne.h> // Encabezado del archivo para la librería del TimerOne

#define trigPin 7 // Pin 7 trigger (salida)
#define echoPin 2 // Pin 2 Echo (entrada)
#define echo_int 0 // Id de la interrupción para el pulso de eco

#define TIMER_US 50 // 50 uS - duración del timer
#define TICK_COUNTS 4000 // 200 mS equivalentes del temporizado

const int pulsador = 8; // Pin 8 pulsador de reinicio (zeros)
const int led1 = 13; // Pin 13 led de activación de reinicio (zeros)
const int led2 = 12; // Pin 12 led de muestreo
const int pwm = 11; // Pin 11 salida PWM

volatile long echo_start = 0; // Guarda el inicio del pulso de eco
volatile long echo_end = 0; // Guarda el fin del pulso de eco
volatile float echo_duration = 0; // Duración - diferencia entre inicio y fin
volatile int trigger_time_count = 0; // contador regresivo para el tiempo del
// pulso de trigger

float cm=0, sumatoria=0, cm1;
int valor=0, cont=0, val;

// -----
// setup() rutina llamada primero.
// Una rutina que se activa una sola vez.
// Usada para inicializar hardware.
// -----
void setup()
{
```

```

pinMode(trigPin, OUTPUT);           // Pin de trigger puesto como salida
pinMode(echoPin, INPUT);           // Pin de echo puesto como entrada
pinMode(pulsador, INPUT);          // Pin del pulsador puesto como entrada
pinMode(led1, OUTPUT);             // Pin del led1 puesto como salida
pinMode(led2, OUTPUT);             // Pin del led2 puesto como salida
pinMode(pwm, OUTPUT);              // Pin del PWM puesto como salida

Timer1.initialize(TIMER_US);       // Inicializar timer 1
Timer1.attachInterrupt( timer1sr ); // Especifica la funcion para el timer
attachInterrupt(echo_int, echo_interrupt, CHANGE); // Especifica la función para la señal
de eco de entrada del sensor
// Serial.begin (9600);             // Inicializa el monitor serial
delay(5000);
inicial();                          // llama la función que inicializa la actual
distancia como zero
}

// -----
// loop() Corre continuamente en un loop.
// Es la rutina de fondo donde se genera la mayor parte del procesamiento.
// Actividades que no sean muy dependientes del tiempo.
// -----
void loop()
{
  for (int N=0; N<15; N++)
  {
    cm=round(echo_duration/29);
    sumatoria=sumatoria+cm;
    delay(50);
  }

  cm=round(sumatoria/15);
  cm=cm/2;

  if (cm<=cm1)
  {
    cm=abs(cm-cm1);

    if (cm>25)
    {
      cm=25;
    }
  }
  else
  {
    cm=0;
  }
}

```

```

Serial.println(cm);                // Muestra la distancia en cm

val = round(cm*255/25);

Serial.println(val);
Serial.println("pwm");

analogWrite(pwm, val);

digitalWrite(led2, HIGH);
delay(1);
digitalWrite(led2, LOW);

sumatoria=0;

valor=digitalRead(pulsador);

if (valor==HIGH)
{
  delay(1500);
  valor=digitalRead(pulsador);
  if (valor==HIGH)
  {
    delay(2500);
    valor=digitalRead(pulsador);
    if (valor==HIGH)
    {
      cont=cont+1;
      digitalWrite(led1, HIGH);    // Prende el LED
      delay(1000);                // Espera por un segundo
      digitalWrite(led1, LOW);    // Apaga el LED
      delay(1000);                // Espera por un segundo
    }
  }
}
if (cont==1){
  zeros();
  cont=0;
}
}

// -----
// timerIsr() interrupción de 50uS ISR()
// Llamado cada vez que el hardware timer 1 acaba.
// -----
void timerIsr()
{
  trigger_pulse();                // Coordina los pulsos del trigger
}

```

```

// -----
// trigger_pulse() llamado cada 50 uS para coordinar los pulsos de trigger.
// Genera un pulso del largo de un tick del timer.
// El ancho de pulso minimo para el HC-SR04 es de 10 uS. Este sistema
// entrega un pulso de 50 uS.
// -----
void trigger_pulse()
{
    static volatile int state = 0;          // variable de máquina de estados

    if (!(--trigger_time_count))           // cuenta 200mS
    {                                       // Fin de conteo - Inicializa el pulso de trigger
        trigger_time_count = TICK_COUNTS; // Recarga
        state = 1;                          // cambia a estado 1 inicializa un pulso
    }

    switch(state)                          // Maquina de estados maneja la ativacion del
    pulso de trigger
    {
        case 0:                             // Estado normal Hace nada
            break;

        case 1:                             // Inicializa pulso
            digitalWrite(trigPin, HIGH);    // pone la salida trigger en alto
            state = 2;                       // cambia a estado 2
            break;

        case 2:                             // Completa el pulso
        default:
            digitalWrite(trigPin, LOW);     // pone la salida trigger en bajo
            state = 0;                       // devuelve el estado a normal 0
            break;
    }
}

// -----
// echo_interrupt() Interrupcion externa de pulso de eco del sensor HC-SR04.
// Llamada cada vez que cambia el estado de la señal de echo.
// -----
void echo_interrupt()
{
    switch (digitalRead(echoPin))           // Testea para ver si la señal esta alta o baja
    {
        case HIGH:                          // Alta asi que se debio iniciar un pulso de echo
            echo_end = 0;                   // Borra el tiempo de fin
            echo_start = micros();          // Guarda el tiempo de inicio
            break;

        case LOW:                           // Baja así que debió finalizar el pulso de echo
            echo_end = micros();            // Guarda el tiempo de fin
    }
}

```

```

        echo_duration = echo_end - echo_start;    // Calcula la duracion del pulso
        break;
    }

}

void inicial()
{
    cm1=30;    // Valor inicial (altura del tanque)
}

void zeros()
{
    for (int X=0; X<10; X++)
    {
        cm1=round(echo_duration/29);
        sumatoria=sumatoria+cm1;
        delay(50);
    }
    cm1=round(sumatoria/10);
    cm1=cm1/2;

    sumatoria=0;
}

```

ANEXO B: Código de programación del microcontrolador ATmega328 para el servo drive.

// Controlando la posición de un servo usando una entrada análoga (voltaje variable)

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo miservo; // crea un objeto nombrado como miservo
```

```
int potpin = 0; // pin análogo para conectar la señal de control analoga
```

```
int val; // variable para leer el valor del pin análogo
```

```
void setup()
```

```
{  
  miservo.attach(9); // pone el pin 9 como entrada del servo  
}
```

```
void loop()
```

```
{  
  val = analogRead(potpin); // lee el valor de la entrada de control analoga (valor  
entre 0 y 1023)  
  val = map(val, 0, 1023, 0, 70); // se escala para usarlo con el servo (valor entre 0 y 70)  
  miservo.write(val); // Manda el servo a la posición  
  delay(15); // espera a que el servo llegue  
}
```

ANEXO C: Hoja de datos sensor de presión.

Pressure

Freescale Semiconductor

MPX5100
Rev 13, 05/2010

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5100 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configuration
- Durable Epoxy Unibody Element
- Easy-to-Use Chip Carrier Option

MPX5100 MPXV5100 Series

0 to 100 kPa (0 to 14.5 psi)
15 to 115 kPa (2.2 to 16.7 psi)
0.2 to 4.7 V Output

Typical Applications

- Patient Monitoring
- Process Control
- Pump/Motor Control
- Pressure Switching

Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$. Decoupling circuit shown in Figure 5 required to meet electrical specifications.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾ Gauge, Differential: MPX5100D/MPX5100G/MPXV5100G Absolute: MPX5100A	P_{OP}	0 15	— —	100 115	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	V _{DC}
Supply Current	I_O	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ V	V_{OFF}	0.088	0.20	0.313	V _{DC}
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ V	V_{FSO}	4.587	4.700	4.813	V _{DC}
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ $V_S = 5.0$ V	V_{FSS}	—	4.500	—	V _{DC}
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	±2.5	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	45	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	±0.5	—	% V_{FSS}

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Offset (V_{OFF}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from minimum or maximum rated pressure at 25°C.
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum pressure applied over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} at 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Warm-Up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
- Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

On-chip Temperature Compensation and Calibration

Figure 3 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in Figure 5. The output will saturate outside of the specified pressure range.

Figure 4 illustrates both the Differential/Gauge and the Absolute Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from

the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPX5100 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

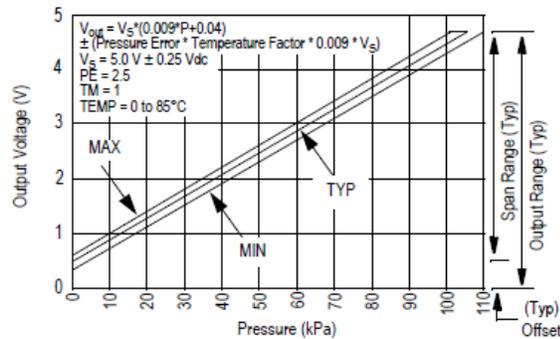


Figure 3. Output vs. Pressure Differential

Pressure

PACKAGE DIMENSIONS

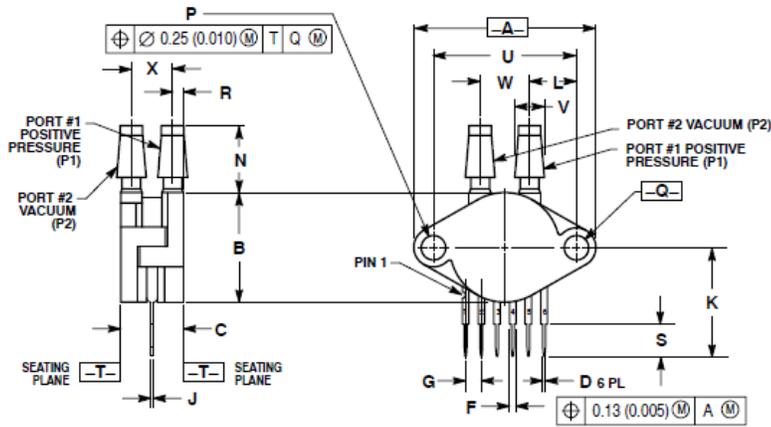
NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. 867B-01 THRU -3 OBSOLETE, NEW STANDARD 867B-04.

STYLE 1:

- PIN 1: V OUT
 2: GROUND
 3: VCC
 4: V1
 5: V2
 6: V EX

Pressure



NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

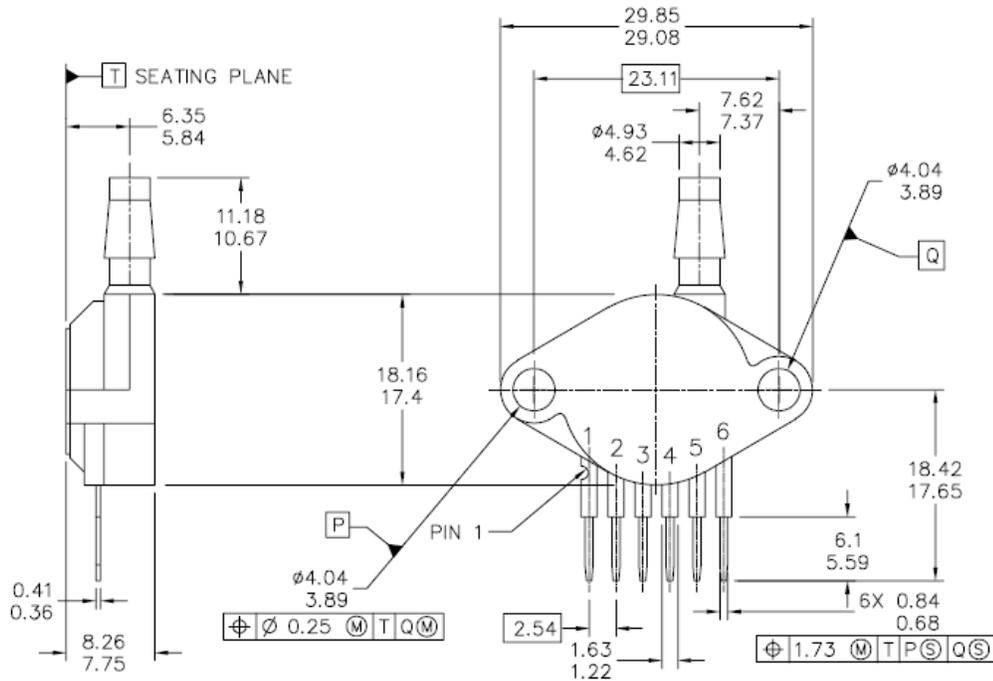
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.08	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.16
C	0.405	0.435	10.29	11.05
D	0.027	0.033	0.68	0.84
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.685	0.725	17.65	18.42
L	0.290	0.300	7.37	7.62
N	0.420	0.440	10.67	11.18
P	0.153	0.159	3.89	4.04
Q	0.153	0.159	3.89	4.04
R	0.063	0.083	1.60	2.11
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.910 BSC		23.11 BSC	
V	0.182	0.194	4.62	4.93
W	0.310	0.330	7.87	8.38
X	0.248	0.278	6.30	7.06

STYLE 1:
 PIN 1: V_{OUT}
 2: GROUND
 3: V_{CC}
 4: V_T
 5: V₂
 6: V_{EX}

CASE 867-08 ISSUE N UNIBODY PACKAGE

Pressure

PACKAGE DIMENSIONS



PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. 867B-01 THRU -3 OBSOLETE, NEW STANDARD 867B-04.

STYLE 1:

- PIN 1: V OUT
- 2: GROUND
- 3: VCC
- 4: V1
- 5: V2
- 6: V EX

ANEXO D: Hoja de datos sensor de caudal.

Flow Rate Monitoring – RFO Type

► 4.5 to 24 VDC Pulsed Output

GEMS Sensors popularized the RotorFlow's paddlewheel design by combining high visibility rotors with solid-state electronics that are packaged into compact, panel mounting housings. They provide accurate flow rate output with integral visual confirmation...all with an unprecedented price/performance ratio. RFO Types feature a VDC pulsed output.

Typical Applications

- Water Purification/Dispensing Systems • Chemical Metering Equipment
- Lasers and Welders • Water Injection Systems
- Semiconductor Processing Equipment • Chillers and Heat Exchangers

Specifications

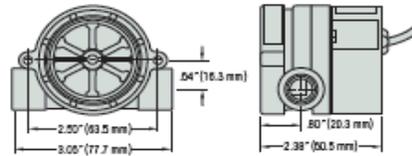
Wetted Materials	
Body	Brass, 316 Stainless Steel or Polypropylene (Hydrolytically Stable, Glass Reinforced)
Rotor Pin	Ceramic
Rotor	PPS Composite, Black
Lens	Polysulfone ¹
O-Ring	Viton [®] (Alloy Bodies); Buna N (Polypropylene Body)
Low Flow Adaptor	Glass Reinforced Polypropylene
Operating Pressure, Maximum	Optional SS Face Plate 500 PSI
Brass or Stainless Steel Body	200 PSIG (13.8 bar) @ 70°F (21°C), 100 PSI (6.9 bar) Max. @ 212°F (100°C) ¹
Polypropylene Body	100 PSIG (6.9 bar) @ 70°F (21°C), 40 PSI (2.8 bar) Max. @ 180°F (82°C)
Operating Temperature,	
Brass or Stainless Steel Body	-20°F to 212°F (-29°C to 100°C)
Polypropylene Body	-20°F to 180°F (-29°C to 82°C)
Electronics	150°F (65°C) Ambient
Viscosity, Maximum	200 SSU
Input Power	4.5 VDC to 24 VDC
Output Signal	4.5 VDC to 24 VDC Pulse. (Sourcing) Pulse Rate Dependent on Flow Rate, Port Size and Range.
Current Consumption	8 mA, No Load
Current Source Output, Max.	70 mA
Frequency Output Range	15 Hz (Low Flow) to 225 Hz (High Flow)
Accuracy	See Table Below
Electrical Termination	22 AWG PVC-Jacketed, 24" Cable. Color Coded: Red = +VDC; Black = Ground; White = Signal Output



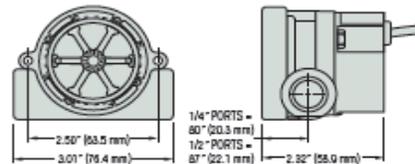
CE  US
File No. E45168

Dimensions

Polypropylene Bodies

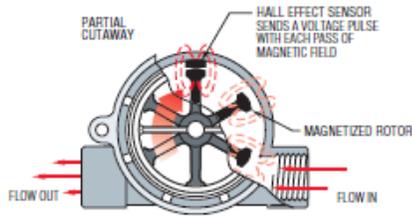


Brass and Stainless Steel Bodies - .25" and .50" Ports



Brass Bodies - .75" and 1.00" NPT Ports

Operating Principle

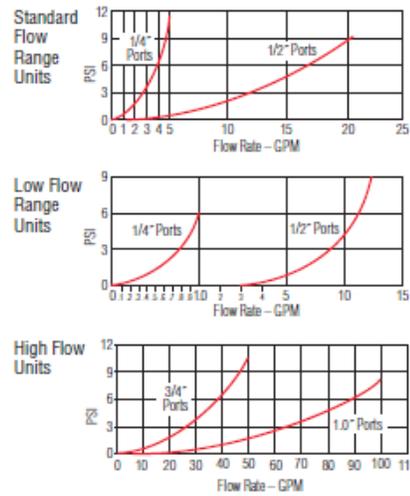


1. As liquid passes through the RotorFlow body, the magnetic rotor spins at a rate proportional to flow. This causes a series of magnetic fields (the rotor vanes) to excite the Hall Effect sensor, producing a series of voltage pulses.
2. The output pulses (RFO) are at the same voltage level as the input (4.5 - 24 VDC) with a frequency proportional to the flow rate. The output signal can be utilized by digital rate meters totalizers or other electronic controllers. RFA Type analog sensors condition the output signal to 0-10 VDC.
3. RotorFlow Indicators may be mounted with flow entering either port. Performance is optimized by positioning ports at the top of the unit, in a horizontal plane.

Frequency vs. Flow Rate-Typical

Flow Rate (GPM)	Output Frequency - Hz					
	RFO Model - Based on Port Size					
	.25"	.25" with Adapter*	.50"	.50" with Adapter*	.75"	1"
0.10		13				
0.25		41				
0.50	15	90				
0.75		137				
1.0	34	186				
1.5	54			17		
2.0	73			25.9		
2.5	90			34		
3.0	110			43		
3.5	128					
4.0	148		34	60		
4.5	168					
5.0	185		44.8	76.7	24	
6.0			55	94		
7.0			65.9	111		
8.0			76	129		22
9.0			87.5	147		

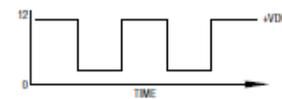
Pressure Drop-Typical



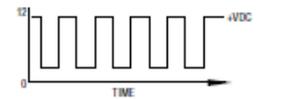
Signal Output

Output signal for RFO Types is an on/off pulse of the DC voltage supplied to the unit, it is compatible with all digital logic families. Input voltage range is 4.5 to 24 VDC. Frequency of the output pulse is proportional to the flow rate and ranges from approximately 15 Hz at low flow to 225 Hz at high flow.

Example:
Low Flow



High Flow



Note: Consult factory for flow rate/frequency curves.

RotorFlow® Sensor Special Capabilities are Yours for the Asking.

Gems caters to OEM needs with special configurations that go beyond the standards in this catalog. We can provide RotorFlow sensors with enhanced chemical compatibility, higher temperature and pressure capabilities, and alternate electrical terminations.

Other Capabilities Available to OEMs:

- Electrical outputs: Combined switch and frequency; transistor switching; 0-10 VDC analog.
- Custom face plate (cast stainless steel face plate pictured)



We are committed to providing our customers with the product that best meets the requirements of their applications. Please call us and tell us what you need, and ask us about Swagelok® tube fittings, faceplate options, and 9/16" and 3/4" straight-thread versions.

Call 800-378-1600

ANEXO E: Hoja de datos de la bomba.

Operating Instructions and Parts Manual

Installation

Models PC1 and PC2 include a 6 foot long suction hose, a water suction attachment, and a replacement parts kit which includes: impeller, gasket, shaft seal, and two motor brushes. Models PC1 and PC2 can be used without the water suction attachment.

Always disconnect power source before attempting to install, service, or maintain the pump. Never handle a pump with wet hands or when standing on wet or damp surface or in water. Fatal electrical shock could occur.

1. A ground fault circuit interrupter (GFCI) is required for Model PC2.

Risk of electrical shock! This pump is supplied with a grounding conductor and grounding type attachment plug. A grounded receptacle in conformance with current NEC and local codes must be used (See Figure 1). Do not use model PC2, 115 V Transfer Pump in swimming pool areas.

2. Model PC1 operates on 12V DC only. Model PC2 operates on 115V only. Voltage and current of power supply must match the requirements of the pump. Model PC1 has color-coded battery clamps for 12V operation. Model PC1 requires 14 amps at 12 VDC.

3. Never use an extension cord to power this unit.

Risk of fatal electrical shock. Never cut off the round grounding prong. Cutting the cord or plug will void the warranty and make the pump inoperable.

4. Use a strainer when pumping from a creek, pond, or source where foreign objects may be sucked into the pump. The strainer should prevent solids from entering the inlet line.
5. A regular garden hose may be used as a discharge line.

6. The inlet or suction hose should not be longer than 15 feet; and the vertical distance between the pump and the water level should not be any higher than 10 feet. The maximum discharge height is 30 feet.
7. At times, an overload due to overheating, low voltage, jammed impeller, etc. may shut the pump off. Unplug or turn off the pump and wait at least ten minutes. The pump will cool and automatically reset. (Model PC2 only)
8. Motor should never be operated for more than 2 hours continuously. Critical heating can occur and might severely damage the pump and void warranty.

Operation

1. Add 1 tablespoon of vegetable oil to both inlet and outlet to prime. Attach included 6 foot suction hose to inlet of pump. Attach garden hose to outlet of pump. There must be a gasket in place to insure that these connections are airtight, otherwise the pump will not prime.
2. Connect water suction attachment to the open end of inlet hose and place below water surface. (Water suction attachment is optional for both PC1 and PC2 models.) The water suction attachment is designed to fit the male end of a garden hose. Place the water suction attachment as near as possible to the middle of the water that is to be pumped.
3. Examine the inlet and outlet hoses to insure there are no blockages, kinks or bends.

⚠ WARNING Place switch in "OFF" position before connecting or disconnecting battery terminal clamps.

IMPORTANT BATTERY INFORMATION

Be certain that the area around the batteries is well ventilated. Before servicing the batteries, blow away gasses by waving a piece of cardboard near the batteries.

⚠ DANGER Dangerous hydrogen gas can be released from batteries while charging. Sparks can ignite the gas in an enclosed space. Wear safety goggles when connecting batteries. Battery connections should be made in a well-ventilated area.

⚠ DANGER Working in the vicinity of lead acid batteries can be dangerous. Before making connections or servicing the batteries, read and follow instructions in all applicable instruction manuals. To reduce the risk of battery explosion, follow the instructions in this manual and those published by the battery manufacturer, as well as those of any other equipment used in the surrounding area.

An assistant should be present or close enough to come to your aid in the event of an emergency. Have a reliable source of fresh water and soap nearby in case battery acid contacts clothing, skin or eyes.

Wear eye and clothing protection when working around lead acid batteries.

Avoid touching your eyes when working around lead acid batteries.

⚠ WARNING If battery acid contacts your eye(s), flush with cold running water for 20 minutes and seek immediate medical attention. If acid contacts your skin or clothing, wash immediately with soap and water.

⚠ WARNING Never smoke or allow a spark or flame in the vicinity of the battery.

⚠ WARNING Avoid dropping metal tools on the battery posts because they may spark or short-circuit the system or

4. Connect pump to power source, with pump in a dry location. Model PC1: Motor must be connected to a fully charged automotive tractor or marine type battery to operate.

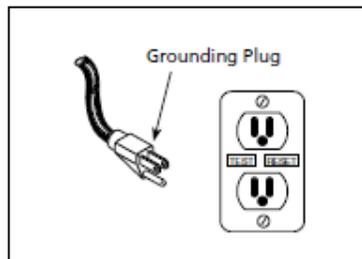


Figure 1

Connect the red clamp to the positive (+) type battery terminal. Connect the black clamp to the negative (-) type battery terminal. See 12V wiring diagram below (Figure 2). **Model PC2:** Plug into a 3-prong ground-type AC receptacle.

Maintenance

⚠ DANGER Always disconnect power source before attempting to install, service, or maintain the pump.

IMPELLER REPLACEMENT

These parts are designed to handle most clear, nonflammable liquids with slight amounts of abrasives. When impeller vanes become worn from use, or damaged due to pumping abrasive liquids or trash, pump performance will be reduced or prevented altogether.

1. Remove the four cover plate screws holding motor housing and pump housing together. Cover plate is now free and can be removed.
2. Inspect gasket and impeller for wear and damage. If there is any

12 VOLT WIRING DIAGRAM

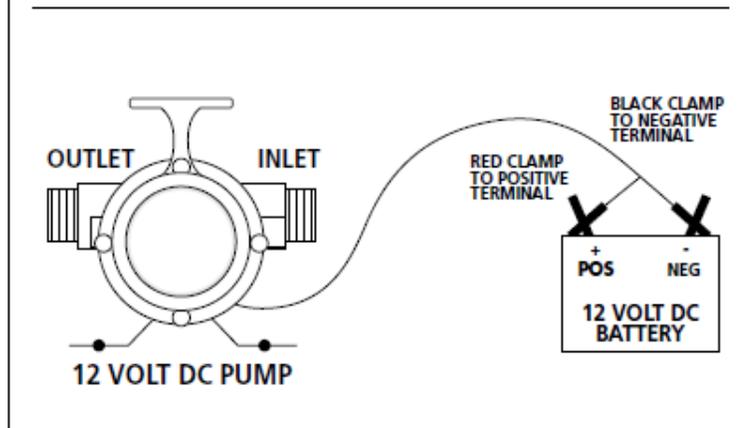


Figure 2

4. Reassemble gasket, cover plate, and cover plate screws.

SHAFT SEAL REPLACEMENT

Motor shafts are sealed with factory pre-lubricated lip-type seals which are good for the life of the pump. If the seal leaks, it is usually because the pump has handled abrasive liquids. If the motor shaft is scored (deep grooves), the complete pump must be replaced.

1. Remove and inspect impeller parts as specified in the impeller replacement instructions. Replace worn parts.
2. Remove two pump body mounting screws and slide pump body from motor. Pry out seal retaining ring and push worn shaft seal from inside of pump body.
3. Lubricate new seal with lightweight oil, push it into pump body with lip facing away from motor, and push in seal retaining ring.

MOTOR BRUSH REPLACEMENT

NOTICE Brushes for this pump should be inspected after 75 hours of operation and replaced if worn. They must be replaced every 100 hours of operation. Service one brush at a time.

- 1) Disconnect pump from power supply.
- 2) Remove brush caps with screwdriver.
- 3) Remove old brush assembly.
- 4) Insert new brush assembly.
- 5) Replace brush caps.

Troubleshooting Chart

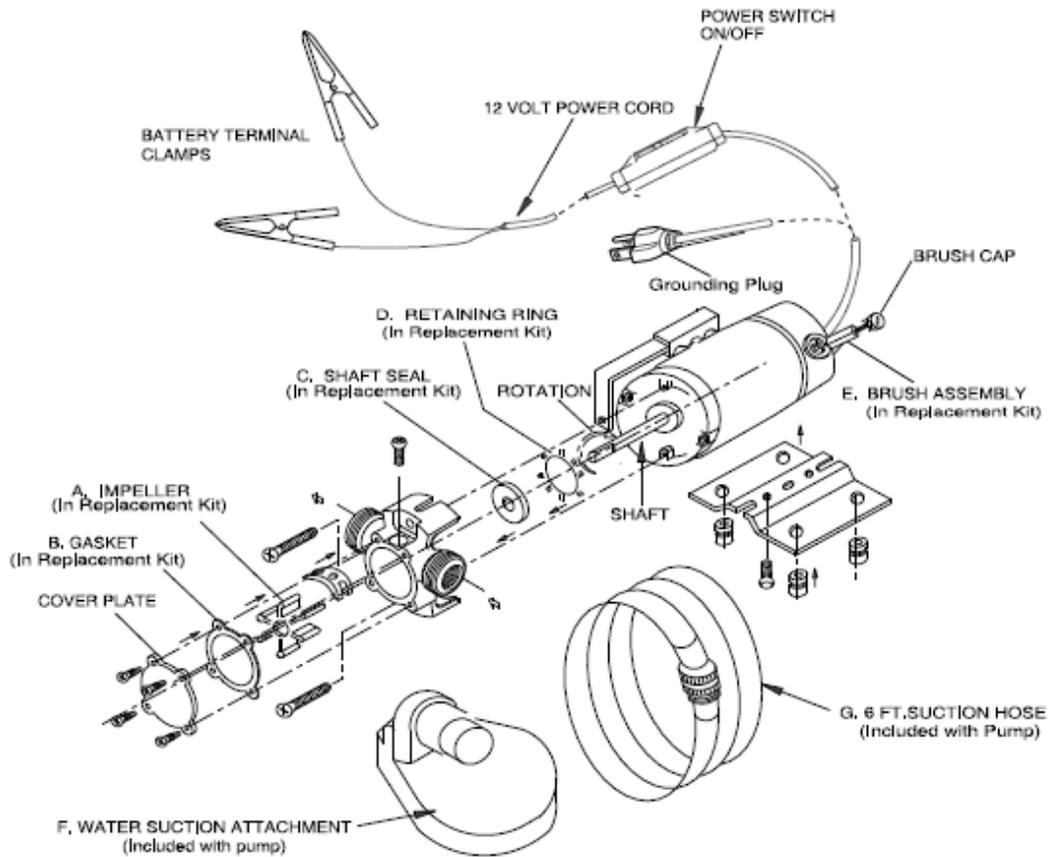
Symptom	Possible Cause(s)	Corrective Action
Pump will not start or run	<ol style="list-style-type: none"> 1. Blown fuse 2. Low line voltage 3. Worn brushes 4. Impeller blocked 5. Motor has overheated (Model PC2 only) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. If blown, replace with proper sized fuse or reset breaker 2. Voltage of power supply must match the voltage of the pump 3. Replace brushes 4. Remove blockage 5. Disconnect from power supply and allow to cool (Minimum 10 minutes)
Pump will not prime or retain prime after operating	<ol style="list-style-type: none"> 1. Air leak in suction line 2. Impeller blocked 3. Worn seal 4. Suction lift too high 5. Hose kinked or looped 6. Fittings not tight 7. Suction hose out of water 8. Clogged inlet 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repair suction line by tightening inlet connection or replace 2. Remove blockage 3. Replace seal 4. Lower pump 5. Straighten hose 6. Tighten fittings 7. Submerge suction hose end 8. Clean inlet
Flow rate is too low	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inlet hose plugged or kinked 2. Low line voltage 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Clean or replace 2. Voltage of power supply must match the voltage of the pump
Shaft seal leaks	<ol style="list-style-type: none"> 1. Worn seal 2. Shaft grooved 3. Pump head loose on motor 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Replace seal 2. Replace pump 3. Insure proper assembly and no obstruction, tighten bolts

Please provide following information:

- Model number
- Serial number (if any)
- Part description and number as shown in parts list

Address any correspondence to:

Wayne Water Systems
101 Production Drive
Harrison, OH 45030 U.S.A.



ANEXO F: Hoja de datos de la tarjeta de adquisición de datos.



Technical Sales

(866) 531-6285
orders@ni.com

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#)

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:12.0

Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB 12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs



- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- One 32-bit, 5 MHz counter
- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost DAQ devices with easy screw connectivity and a small form factor. With plug-and-play USB connectivity, these devices are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Mac OS X
- Windows 2000/XP
- Windows 7
- Windows CE
- Windows Mobile
- Windows Vista 32-bit
- Windows Vista 64-bit

Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-DAQmx Base

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic .NET
- Visual C#

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate (kS/s)	Analog Outputs	Output Resolution	Output Rate (Hz)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Triggering
USB-6008	8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital
USB-6009	8 single-ended/4 differential	14	48	2	12	150	12	1	Digital

[Back to Top](#)

Application and Technology

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for applications where a low-cost, small form factor and simplicity are essential. Examples include the following:

- Data logging—quick and easy environmental or voltage data logging
- Academic lab use—student ownership of data acquisition hardware for completely interactive lab-based courses (Academic pricing available. Visit the [academic product page](#) for details.)
- OEM applications as I/O for embedded systems

Recommended Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, SignalExpress, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions.

NI measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A guide to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW
- LabWindows/CVI; SignalExpress; and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements
- Automatic timing, triggering, and synchronization routing to make advanced applications easy
- More than 3,000 free software downloads at ni.com/zone to jump-start your project
- Software configuration of all digital I/O features without hardware switches/jumpers
- Single programming interface for analog input, analog output, digital I/O, and counters on hundreds of multifunction DAQ hardware devices; M Series devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software—LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; and SignalExpress 2.x

Every National Instruments DAQ device includes a copy of SignalExpress LE data-logging software, so you can quickly acquire, analyze, and present data without programming. The NI-DAQmx Base driver software is provided for use with Linux, Mac OS X, Windows Mobile, and Windows CE OSs.

Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-600x Connectivity Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver. In addition, the USB-600x Prototyping Kit provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

NI USB DAQ for OEMs

Shorten your time to market by integrating world-class National Instruments OEM measurement products into your embedded system design. Board-only versions of NI USB DAQ devices are available for OEM applications, with competitive quantity pricing and available software customization. The NI OEM Elite Program offers free 30-day trial kits for qualified customers. Visit ni.com/oem for more information.

Information for Student Ownership

To supplement simulation, measurement, and automation theory courses with practical experiments, NI has developed the USB-6008 and USB-6009 student kits, which include the LabVIEW Student Edition and a ready-to-run data logger application. These kits are exclusively for students, giving them a powerful, low-cost, hands-on learning tool. Visit ni.com/academic for more details.

Information for OEM Customers

For information on special configurations and pricing, call (800) 813-3693 (United States only) or visit ni.com/oem. Go to the Ordering Information section for part numbers.

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
NI USB-6009			
NI USB-6009 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.	779026-01	No accessories required.	
NI USB-6009 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition.	779321-22	No accessories required.	
NI USB-6009 OEM (no enclosure)	193132-01	No accessories required.	
Prototyping Kit			
NI USB-600x Prototyping Kit	779511-01	No accessories required.	
NI USB-6008			
NI USB-6008 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.	779051-01	No accessories required.	
NI USB-6008 OEM (no enclosure)	193132-02	No accessories required.	
NI USB-6008 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition.	779320-22	No accessories required.	
Connectivity Kit			
NI USB-600x Connectivity Kit	779371-01	No accessories required.	

Software Recommendations

NI LabVIEW Full Development System for Windows



- Fully integrated graphical system design software
- Support for a wide range of measurement hardware, I/O, and buses
- Custom, event-driven user interfaces for measurement and control
- Extensive signal processing, analysis, and math functionality
- Advanced compiler to ensure high-performance execution and code optimization
- Includes SSP for professional technical support, online training, and software upgrades

SignalExpress for Windows



- Quickly configure projects without programming
- Control over 400 PC-based and stand-alone instruments
- Log data from more than 250 data acquisition devices
- Perform basic signal processing, analysis, and file I/O
- Scale your application with automatic LabVIEW code generation
- Create custom reports or easily export data to LabVIEW, DIAdem or Microsoft Excel

NI LabWindows™/CVI for Windows



- Real-time advanced 2D graphs and charts
- Complete hardware compatibility with IVI, VISA, DAQ, GPIB, and serial
- Analysis tools for array manipulation, signal processing statistics, and curve fitting
- Simplified cross-platform communication with network variables
- Measurement Studio .NET tools (included in LabWindows/CVI Full only)
- The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation.

NI Measurement Studio Standard Edition



- Customizable graphs and charts for WPF, Windows Forms, and ASP.NET Web Forms UI design
- Analysis libraries for basic signal generation
- Hardware integration support with data acquisition and instrument control libraries
- Project setup wizards to speed up development
- Support for Microsoft Visual Studio .NET 2012/2010/2008

[Back to Top](#)

Support and Services

System Assurance Programs

NI system assurance programs are designed to make it even easier for you to own an NI system. These programs include configuration and deployment services for your NI PXI, CompactRIO, or Compact FieldPoint system. The NI Basic System Assurance Program provides a simple integration test and ensures that your system is delivered completely assembled in one box. When you configure your system with the NI Standard System Assurance Program, you can select from available NI system driver sets and application development environments to create customized, reorderable software configurations. Your system arrives fully assembled and tested in one box with your software preinstalled. When you order your system with the standard program, you also receive system-specific documentation including a bill of materials, an integration test report, a recommended maintenance plan, and frequently asked question documents. Finally, the standard program reduces the total cost of owning an NI system by providing three years of warranty coverage and calibration service. Use the online product advisors at ni.com/advisor to find a system assurance program to meet your needs.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships and training credits** - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted.

Analog Input	
Converter type	Successive approximation
Analog inputs	8 single-ended, 4 differential, software selectable
Input resolution	
NI USB-6008	12 bits differential, 11 bits single-ended
NI USB-6009	14 bits differential, 13 bits single-ended
Max sampling rate (aggregate) ¹	
NI USB-6008	10 kS/s
NI USB-6009	48 kS/s
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Single-ended	±10 V
Differential	±20 V ² , ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V
Working voltage	±10 V
Input impedance	144 kΩ
Overvoltage protection	±35
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ³	
Single-ended	
±10 V range	5 mVrms
Differential	
±20 V range	5 mVrms
±1 V range	0.5 mVrms

Absolute accuracy at full scale, single-ended		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±10	14.7	138

Absolute accuracy at full scale, differential ⁴		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8

Absolute accuracy at full scale, differential ⁴		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

Analog Output

Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range	0 to +5 V
Output impedance	50 Ω
Output current drive	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/μs
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale

Digital I/O

Digital I/O	
P0.<0..7>	8 lines
P1.<0..3>	4 lines
Direction control	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type	
NI USB-6008	Open collector (open-drain)
NI USB-6009	Each channel individually programmable as active drive (push-pull) or open collector (open-drain)
Compatibility	TTL, LVTTL, CMOS
Absolute maximum voltage range	-0.5 to 5.8 V with respect to GND
Pull-up resistor	4.7 kΩ to 5 V
Power-on state	Input

Digital logic levels			
Level	Min	Max	Units
Input low voltage	-0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	—	50	μA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8	V
Output high voltage			
Active drive (push-pull), I = -8.5 mA	2.0	3.5	V
Open collector (open-drain), I = -0.6 mA, nominal	2.0	5.0	V
Open collector (open-drain), I = -8.5 mA, with external pull-up resistor	2.0	—	V

External Voltage

+5 V output (200 mA maximum)	+5 V typical, +4.85 V minimum
+2.5 V output (1 mA maximum)	+2.5 V typical
+2.5 V accuracy	0.25% max
Reference temperature drift	50 ppm/°C max

Counter

Number of counters	1
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting (falling-edge)
Counter direction	Count up
Pull-up resistor	4.7 kΩ to 5 V
Maximum input frequency	5 MHz
Minimum high pulse width	100 ns
Minimum low pulse width	100 ns
Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V

Power Requirements

USB	
4.10 to 5.25 VDC	80 mA typical, 500 mA max
USB suspend	300 μA typical, 500 μA max

Physical Characteristics

Dimensions	
Without connectors	6.35 cm × 8.51 cm × 2.31 cm (2.50 in. × 3.35 in. × 0.91 in.)
With connectors	8.18 cm × 8.51 cm × 2.31 cm (3.22 in. × 3.35 in. × 0.91 in.)
I/O connectors	USB series B receptacle, (2) 16 position terminal block plug headers
Weight	
With connectors	84 g (3 oz)
Without connectors	54 g (1.9 oz)
Screw-terminal wiring	16 to 28 AWG
Torque for screw terminals	0.22–0.25 N · m (2.0–2.2 lb · in.)

Safety

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Safety Voltages

Connect only voltages that are within these limits.

Channel-to-GND	±30 V max, Measurement Category I
----------------	-----------------------------------

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as MAINS voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



Caution Do not use this module for connection to signals or for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.

Safety Standards

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Hazardous Locations

The NI USB-6008/6009 device is not certified for use in hazardous locations.

Environmental

The NI USB-6008/6009 device is intended for indoor use only.

Operating temperature

(IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2) 0 to 55 °C

Operating humidity

(IEC 60068-2-56) 5 to 95% RH, noncondensing

Maximum altitude

2,000 m (at 25 °C ambient temperature)

Storage temperature

(IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2) -40 to 85 °C

Storage humidity

(IEC 60068-2-56) 5 to 90% RH, noncondensing

Pollution Degree (IEC 60664)

2

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity
- EN 55011 Emissions; Group 1, Class A
- CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A



Note For EMC compliance, operate this device with double-shielded cables.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)



Note Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

- ¹ System dependent.
- ² ± 20 V means that $|AI+ - (AI-)| \geq 20$ V. However, AI+ and AI- must both be within ± 10 V of GND.
- ³ System noise measured at maximum sample rate.
- ⁴ Input voltages may not exceed the working voltage range.

[Back to Top](#)

©2013 National Instruments. All rights reserved. CompactRIO, CVI, FieldPoint, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, NI, ni.com, NI-DAQ, and SignalExpress are trademarks of National Instruments. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from National Instruments and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with National Instruments.

[My Profile](#) | [RSS](#) | [Privacy](#) | [Legal](#) | [Contact NI](#) © 2014 National Instruments Corporation. All rights reserved.