

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA  
MÁQUINA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS SEDIMENTADAS Y NO  
SEDIMENTADAS



GUILLERMO ALEXANDER HIDALGO SALAS  
JOSE LUIS OCAÑA MERA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRONICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2009

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA  
MÁQUINA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS SEDIMENTADAS Y NO  
SEDIMENTADAS

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electrónico



GUILLERMO ALEXANDER HIDALGO SALAS  
JOSE LUIS OCAÑA MERA

Director: Ingeniero Darío Fajardo Fajardo

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRONICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2009

## RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el proyecto de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”

Artículo Primero del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

---

Asesor

San Juan de Pasto

---

Fecha de sustentación

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	19
1. CONCEPTOS BASICOS .....	20
1.1. DESCRIPCION DE LA MAQUINA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO.....	20
1.1.1. PROPOSITO DE ESTUDIO DE LA MAQUINA DE TRANSPORTE DE MEZCLAS SEDIMENTADAS Y NO SEDIMENTADAS.....	20
1.1.2. ESQUEMA Y DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA DE TRANSPORTE DE MEZCLAS SEDIMENTADAS Y NO SEDIMENTADAS.....	20
1.1.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL EQUIPO .....	21
1.2. ELEMENTOS Y MECANISMOS DE MEDICIÓN ACTUALES.....	23
1.3. MÉTODOS Y SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA .....	25
1.3.1. MEDICIÓN DE PRESIÓN .....	25
1.3.1.1. TIPOS DE PRESIÓN .....	26
1.3.1.2. ELEMENTOS PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN .....	27
1.3.2. MEDICIÓN DE CAUDAL .....	30
1.3.2.1. ELEMENTOS DE MEDIDA PARA CAUDAL .....	30
1.3.3. MEDICIÓN DE NIVEL.....	36
1.3.3.1. ELEMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE NIVEL .....	36
1.3.4. MEDICION DE INCLINACION O ANGULO .....	40
1.3.4.1. ELEMENTOS PARA MEDIDA DE ANGULO O INCLINACIÓN.....	40
2. PRUEBAS Y SELECCIÓN DE LOS SENSORES A UTILIZAR EN LA INSTRUMENTACIÓN .....	42
2.1. SENSOR DE DISTANCIA SHARP GP2D120.....	42
2.1.1. FUNCIONAMIENTO .....	42
2.1.2. PRUEBAS Y PARAMETROS DE ESCOGENCIA .....	45

2.2.	SENSORES DE PRESIÓN MPX2050GP .....	45
2.2.1.	FUNCIONAMIENTO .....	45
2.2.2.	PRUEBAS Y PARAMETROS DE ESCOGENCIA .....	47
2.3.	SENSORES ULTRASONICOS 40TR12B.....	47
2.3.1.	FUNCIONAMIENTO .....	47
2.3.2.	PRUEBAS Y PARAMETROS DE ESCOGENCIA .....	48
2.4.	SENSOR CAPACITIVO SC12MM.....	48
2.4.1.	FUNCIONAMIENTO .....	49
2.4.2.	PRUEBAS Y PARAMETROS DE ESCOGENCIA .....	49
3.	IMPLEMENTACION DE LOS SENSORES.....	50
3.1.	SENSORES OPTICOS.....	50
3.1.1.	NIVEL .....	50
3.1.2.	INCLINACION.....	51
3.2.	SENSORES DE PRESIÓN.....	53
3.2.1.	PRESIÓN.....	53
3.2.2.	CAUDAL.....	54
4.	ACONDICIONADORES DE SEÑAL.....	56
4.1.	ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA SENSORES DE PRESIÓN.....	56
4.2.	ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA SENSORES OPTICOS .....	57
5.	DISEÑO DEL HARDWARE DE FUNCIONAMIENTO .....	58
5.1.	CONVERSIÓN ANALÓGICA DIGITAL DE LAS SEÑALES DE LOS SENSORES .....	58
5.2.	MICROCONTROLADOR.....	58
5.3.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN .....	59
5.4.	CONVERSOR SERIAL A USB.....	59
5.5.	CIRCUITOS ELABORADOS .....	60
5.5.1.	TARJETA DE CONTROL.....	60
5.5.2.	MODULOS AMPLIFICACIÓN PARA SENSORES.....	62
6.	CALIBRACIÓN .....	64

6.1.	PRESIÓN Y CAUDAL .....	64
6.2.	NIVEL .....	69
6.3.	INCLINACIÓN.....	71
7.	SOFTWARE.....	73
7.1.	¿QUÉ ES LABVIEW? .....	73
7.2.	DISEÑO DEL PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	73
7.2.1.	COMUNICACIÓN SERIAL .....	74
7.2.2.	DISEÑO DE SUBPROGRAMAS.....	74
7.2.2.1.	SUBPROGRAMA PARA MEDIR PRESION.....	75
7.2.2.2.	SUBPROGRAMA PARA MEDIR INCLINACIÓN .....	78
7.2.2.3.	SUBPROGRAMA PARA MEDIR NIVEL .....	81
7.2.3.	PROGRAMA GENERAL.....	81
7.2.4.	PANEL FRONTAL .....	87
7.3.	FIRMWARE .....	90
8.	MONTAJE EN EL LABORATORIO.....	91
8.1.	SENSORES OPTICOS.....	91
8.1.1.	NIVEL .....	91
8.2.	SENSORES DE PRESIÓN.....	96
8.2.1.	PRESION.....	96
8.2.2.	CAUDAL.....	99
9.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	100
9.1.	NIVEL .....	100
9.2.	CAUDAL .....	101
9.3.	PRESIÓN .....	103
9.4.	INCLINACIÓN.....	106
10.	CONCLUSIONES .....	108
11.	RECOMENDACIONES.....	110
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la máquina de transporte de mezclas sedimentadas y no sedimentadas .....	21
Figura 2. Tanques utilizados para la medición de caudal .....	23
Figura 3. Tablero de medición .....	24
Figura 4. Tipos de Presión .....	27
Figura 5. Diagrama del comportamiento en medidores diferenciales.....	30
Figura 6. Diagramas de medidor tubo de orificio .....	31
Figura 7. Diagrama medidor tubo de Venturi .....	32
Figura 8. Diagrama medidor Tubo Pitot .....	33
Figura 9. Esquema del sistema de medidor de caudal electromagnético.....	33
Figura 10. Esquema de un medidor ultrasónico por impulsos .....	35
Figura 11. Esquema de un medidor ultrasónico utilizando efecto Doppler.....	36
Figura 12. Esquema de un sistema de medida capacitivo de nivel.....	38
Figura 13. Esquema de funcionamiento de un sistema de medida de nivel ultrasónico.....	39
Figura 14. Sensor de distancia Sharp GP2D120 .....	42
Figura 15. Tensión de salida voltaje vs distancia sensor de distancia GP2D120 .....	43
Figura 16. Esquema de funcionamiento del sensor de posición GP2D120 .....	44
Figura 17. Sensor de presión MPX2050GP .....	46
Figura 18. Diagrama interior del sensor de Presión MPX2050GP .....	46
Figura 19. Diagrama de funcionamiento del sensor ultrasónico.....	47
Figura 20. Disposición del sensor óptico GP2D120 en el canal.....	50
Figura 21. Disposición del sensor óptico GP2D 120 para medir inclinación. ....	51
Figura 22. Inclinación del canal.....	52
Figura 23 .Mayor Inclinación del canal. ....	52
Figura 24. Inclinación positiva del canal .....	53
Figura 25. Disposición de los sensores de presión en el canal. ....	54

Figura 26. Ubicación de sensores de presión para medir caudal. ....	55
Figura 27. Conexiones entre el amplificador y el sensor de presión. ....	56
Figura 28. Conexiones entre el amplificador y el sensor óptico. ....	57
Figura 29. Cable Usb232 .....	59
Figura 30. Diagrama de circuito de Placa Principal .....	61
Figura 31 .Diagrama amplificadores sensores infrarrojos .....	62
Figura 32. Circuito amplificadores sensores de presión .....	63
Figura 33. Calibrador de Pesos muertos .....	64
Figura 34. Gráfica voltajes de salida del sensor MPX2050GP a diferentes presiones ...	66
Figura 35. Gráfica promedio voltaje de salida del sensor MPX2050GP a diferentes presiones.....	67
Figura 36. Curvas de comportamiento de la salida del sensor óptico en voltaje y digitalizado.....	70
Figura 37. Diagrama de puntos de movimiento en la estructura general.....	71
Figura 38. Calibraciones de distancia correspondientes a la posición de los ángulos en tubo de soporte .....	72
Figura 39. Subprograma Inicia sesión VISA .....	74
Figura 40. Bloque de Escritura .....	74
Figura 41. Bloque de Lectura .....	74
Figura 42. Bloque cierre sesiónVISA .....	74
Figura 43. Bloque conversor de caracteres a números. ....	75
Figura 44. Subprograma y visualización del subprograma en el programa general. ....	76
Figura 45. Indicador manométrico en el panel frontal.....	76
Figura 46. Subprograma para medir presión P2 para caudal .....	77
Figura 47. Subprograma para medir presión P3.....	77
Figura 48. Subprograma para medir presión P4.....	77
Figura 49. Bloque de comparación menor que .....	78
Figura 50. Bloque que incrementa contador .....	78
Figura 51. Bloque de igualdad aritmética .....	78
Figura 52. Bloque de resta aritmética .....	78

Figura 53. Bloque que determina el valor Absoluto de un número .....	79
Figura 54. Bloque de rango .....	79
Figura 55. Bloque de decisión dependiente Del bloque de rango.....	79
Figura 56. Bloque de suma .....	79
Figura 57. Estructura caso dependiente una decisión .....	79
Figura 58. Estructura Del bloque de de while.....	79
Figura 59. Subprograma de Inclinación.....	80
Figura 60. Subprograma de inclinación de datos.....	81
Figura 61. Eleva un número entrada A una potencia deseada .....	82
Figura 62. Control de tiempo .....	82
Figura 63. Selector de medición de caudal .....	82
Figura 64. Selector de medición de presión en el canal posición 1 .....	82
Figura 65. Selector de medición de De presión en el canal posición 1.....	82
Figura 66. Selector de medición de Inclinación de la viga de soporte del canal .....	82
Figura 67. Selector de medición de nivel en el canal.....	83
Figura 68. Indicador de encendido .....	83
Figura 69. Estructura para almacenar datos en plantillas Excel .....	83
Figura 70. Estructura de control de tiempo.....	83
Figura 71. Bloque para el diseño de animaciones.....	83
Figura 72. Indicador de nivel .....	83
Figura 73. Indicador Inclinación.....	83
Figura 74. Indicador Presión canal posición 1 .....	83
Figura 75. Indicador Presión canal posición 2.....	83
Figura 76. Graficador de caudal vs tiempo .....	83
Figura 77. Acople de señal para guardar Datos .....	84
Figura 78. Menú para la selección de unidades de presión.....	84
Figura 79. Vista del programa general (Parte I).....	85
Figura 80. Vista del programa general (Parte II) .....	86
Figura 81. Selector de inicio de medición de caudal e indicadores de medida de caudal y presión.....	87

Figura 82. Selector de inicio de medición de nivel e indicador de llenado en el tubo....	87
Figura 83. Selector de inicio de medición de inclinación de la viga y animación del proceso .....	88
Figura 84. Selectores de medida de presión en las posiciones del canal y visualización de las mismas. ....	88
Figura 85. Selector de tiempo y unidades de medida para presión y caudal, detención del programa.....	88
Figura 86. Vista del panel frontal del programa de control y adquisición de datos.....	89
Figura 87. Estructura de soporte de sensor óptico para medir nivel. ....	91
Figura 88. Estructura de soporte de sensor óptico para medir nivel, vista lateral.....	92
Figura 89. Polea que mueve la viga de soporte del canal. ....	93
Figura 90. Disposición del sensor óptico paralelo a la viga de soporte. ....	94
Figura 91. Sistema de reflexión vista superior.....	94
Figura 92. Soporte de la lámina de reflexión anclado al piso. ....	95
Figura 93. Refuerzo lateral de la lámina de reflexión.....	95
Figura 94. Ubicación de los sensores de presión en cajas telefónicas. ....	96
Figura 95. Conexión de los pines del sensor de presión con el conector RJ11.....	96
Figura 96. Instalación del piezómetro en la unión de teflón. ....	97
Figura 97. Abertura del agujero para la instalación del piezómetro en la unión de teflón. ....	97
Figura 98. Derivación en el piezómetro para la medida análoga y la medida digital. ....	98
Figura 99. Acercamiento a la derivación existente. ....	98
Figura 100. Conexión entre los sensores y las derivaciones. ....	99
Figura 101. Gráfica datos de caudal obtenido con los 2 sistemas de medida .....	102
Figura 102. Gráfica de resultados en sensor 3 .....	104
Figura 103. Gráfica de resultados en sensor 4 .....	105

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de calibración para los sensores de presión .....	65
Tabla 2. Promedio de voltaje de salida del sensor a diferentes presiones.....	67
Tabla 3. Pruebas de presión en sensores del canal.....	68
Tabla 4. Rangos de valores digitalizados para definir calibración de inclinación.....	72
Tabla 5. Datos tomados canal vacío.....	100
Tabla 6. Datos Canal nivel medio.....	100
Tabla 7. Datos canal lleno.....	101
Tabla 8. Comparación datos utilizando 2 sistemas de medida .....	102
Tabla 9. Pruebas Sensor 3 a diferentes presiones .....	103
Tabla 10. Pruebas Sensor 3 a diferentes presiones .....	105
Tabla 11. Rango de alcance para cada valor de ángulo .....	106

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DEL FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR

ANEXO B. IMÁGENES COMPLEMENTARIAS

## GLOSARIO

**MICROCONTROLADOR:** Dispositivo electrónico que incorpora un procesador, memoria y puertos en un solo integrado, capaz de ejecutar múltiples acciones e interacciones (léase comunicación mediante puertos) que son programadas en el mediante un computador y un lenguaje de programación.

**OSCILADOR:** Dispositivo que cambia el estado de su salida entre diferentes valores a lo largo del tiempo, puede ser digital cambiando entre dos estados o analógico cambiando en múltiples valores que siguen una función matemática.

**ALGORITMO:** Secuencia de pasos para obtener un resultado.

**FIRMWARE:** Programa que se incluye en dispositivos electrónicos como microcontroladores y que controlan de manera básica el funcionamiento del mismo.

**ENABLE:** Es una función disponible en muchos circuitos integrados accesible mediante uno de sus pines y que permite la desactivación y activación del dispositivo de manera remota por medio de una señal alta o baja dependiendo del caso.

**MODA ESTADISTICA:** Es el valor que se presenta con mayor frecuencia en una distribución de datos.

**PROMEDIO ESTADISTICO:** Expresada de forma intuitiva se puede decir que el promedio es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación.

**INSTRUMENTACIÓN:** Colección de instrumentos o su aplicación para el propósito de observación, medición, control o alguna combinación de estos.

**MEDIDA:** Determinación de una existencia de una magnitud o una variable.

**PRECISIÓN:** Medida de la reproducibilidad de las mediciones; esto es, dado el valor fijo de una variable, la precisión es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de otra.

**EXACTITUD:** Aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.

**SENSIBILIDAD:** Relación de la señal de salida o respuesta del instrumento respecto al cambio de la entrada o variable medida.

**RESOLUCIÓN:** Es el cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento.

**ERROR:** Desviación a partir del valor real de la variable medida.

**SCAN:** Muestrear, en una determinada manera, cada una de un número de variables intermitentemente. La función de un dispositivo de escaneo es a menudo determinar el estado o valor de una variable. El dispositivo puede ser asociado a otras funciones tales como registro o alarma.

**SENSOR:** La parte de un instrumento o lazo que primero percibe el valor de una variable de proceso y que asume un estado o salida correspondiente, determinada y comprensible. El sensor puede estar integrado o separado con otro elemento funcional de un lazo.

**TRANSDUCTOR:** Un término general para un dispositivo que recibe información en la forma de una o más cantidades físicas, modifica la información y/o su forma si es requerido y produce una señal de salida resultante.

**TRANSMISOR:** Un dispositivo que captura la variable de proceso por medio de un sensor y tiene una salida cuyo valor en estado estacionario varía en función de la variable de proceso. El sensor puede o no estar integrado junto al transmisor.

**DISPOSITIVO DE COMPUTO:** Un dispositivo o función que desarrolla uno o más cálculos u operaciones lógicas, o ambas, y transmite una o más señales de salida resultantes. Un dispositivo de cómputo es generalmente llamado un relay de cómputo.

**RELUCTANCIA:** La reluctancia magnética de un material, es la resistencia que éste posee al verse influenciado por un campo magnético.

## LISTA DE ACRÓNIMOS

USB: Acrónimo de Universal Serial Bus, en inglés bus serial universal. Es un puerto de comunicaciones disponible en muchos dispositivos electrónicos.

CCD: siglas en inglés de *charge-coupled device*: dispositivo de cargas eléctricas interconectadas, es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso.

CMOS: siglas en inglés de Complementary Metal Oxide Semiconductor, Semiconductor de Metal Óxido Complementario, es una de las familias lógicas empleadas en la fabricación de circuitos integrados

USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter, en inglés receptor/transmisor síncrono/asíncrono universal. Es un módulo contenido en dispositivos que permite el envío y recepción de datos por protocolo RS232.

BPS: Bits Per Second, en inglés bits por segundo. Es una medida para representar la velocidad de transmisión en una comunicación digital.

IR: acrónimo de InfraRed, dispositivos que trabajan con ondas comprendidas en el espectro infrarrojo, con una longitud de onda pequeña y alta frecuencia.

PSD: Siglas en inglés de *Position Detector Sensor*, Sensor detector de Posición, es un tipo de sensores usados en instrumentación en los que su salida varía dependiendo de la cercanía de un obstáculo.

## RESUMEN

EL SIGUIENTE INFORME RESUME LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO: “INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA MÁQUINA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS SEDIMENTADAS Y NO SEDIMENTADAS”.

ESTE PROYECTO PERMITIÓ EL DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS CONCERNIENTES DE UN PROCESO DEFINIDO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO. LA UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW COMO BASE PRINCIPAL DEL PROYECTO FACILITÓ EL DESARROLLO DEL MISMO YA QUE REPRESENTA UNA HERRAMIENTA COMPLETA, DE LA CUAL SE APROVECHO AL MÁXIMO LAS CAPACIDADES QUE OFRECE EN UN TRABAJO DE ESTE ESTILO.

EL PRIMER PASO DEL PROYECTO CONSISTIÓ EN LA INVESTIGACIÓN Y PRUEBAS QUE CONDUJERON A ESCOGER ENTRE UNA GAMA EXTENSA DE POSIBILIDADES Y MÉTODOS DE SENSADO PARA REALIZAR UNA ADQUISICIÓN ELECTRÓNICA DE LAS VARIABLES FÍSICAS A MEDIR, LOS MÁS APROPIADOS EN TANTO A FUNCIONALIDAD Y FACILIDAD DE ADQUISICIÓN; UNA VEZ SELECCIONADOS ESTOS MÉTODOS SE REALIZÓ UN MONTAJE Y CALIBRACIÓN CORRESPONDIENTES DE LOS SISTEMAS INDIVIDUALES DE MEDIDA, ESTOS SE COMUNICAN CON UN MÓDULO PRINCIPAL EL CUAL ES EL ENCARGADO DE CONVERTIR LAS SEÑALES ANÁLOGAS EN DIGITALES, ADEMÁS AGRUPA Y ORGANIZA LAS SEÑALES PARA SER TRANSMITIDAS A UN COMPUTADOR POR MEDIO DE UNA INTERFAZ USB, UNA VEZ LAS SEÑALES SEAN RECIBIDAS SE PROCEDE A REALIZAR UN ACONDICIONAMIENTO FINAL Y POSTERIORMENTE LA VISUALIZACIÓN DE LAS MISMAS ADICIONANDO UNA HERRAMIENTA QUE ALMACENA LOS DATOS SEGÚN LAS NECESIDADES DEL USUARIO.

LAS PRUEBAS REALIZADAS PERMITIERON CORROBORAR QUE LOS DATOS OBTENIDOS SON SIMILARES A LOS MEDIDOS CON LOS SISTEMAS TRADICIONALES, RESALTANDO QUE EL SISTEMA ELECTRÓNICO OFRECE UNA MAYOR EXACTITUD Y PRECISIÓN YA QUE SE ELIMINA EL FACTOR HUMANO, Y SE GARANTIZA UN COMPORTAMIENTO IGUAL EN TODAS LAS PRUEBAS.

## ABSTRACT

THE NEXT DOCUMENT RESUMES THE ACTIVITIES MADE DURING THE DEVELOPMENT OF OUR DEGREE PROJECT: "ELECTRONIC INSTRUMENTATION AND DATA ACQUISITION ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SEDIMENTED AND NOT SEDIMENTED MIXTURES MACHINE"

THIS PROJECT ALLOWED THE DESIGN OF AN INTEGRAL ACQUISITION AND VISUALIZATION SYSTEM ON DATA OF ONE DETERMINED PROCESS IN THE HYDRAULIC LAB AT UNIVERSITY OF NARIÑO. THE USE OF LABVIEW AS FOUNDATION SOFTWARE MADE EASIEST THE WORK BECAUSE IT REPRESENTS A COMPLETE TOOL, WHICH IMPROVES THE CAPABILITIES IN THIS KIND OF WORK.

THE FIRST STEP IN THIS PROJECT WAS THE RESEARCH AND PROBES WHICH LEAD THE CHOOSE BETWEEN AN A LARGE POSSIBILITIES AND METHODS ABOUT THE TECHNIQUES AND TECHNOLOGIES TO ACHIEVE A GOOD SYSTEM OF ELECTRONIC ACQUISITION OF THE PHYSICAL VARIABLES TO MEASURE, REALIZING THE FACTS OF FUNCTIONALITY AND THE VIABILITY OF ACQUIRE THIS ITEMS. ONCE THE SYSTEMS WERE SELECTED, A CALIBRATION AND ASSEMBLY WAS MADE; EACH INDIVIDUAL MEASURING SYSTEM IS PLUGGED INTO A MAIN MODULE WHICH IS IN CHARGE OF THE CONVERSION OF ALL ANALOG SIGNALS INTO A DIGITAL ONES, ALSO FUSE ALL SIGNALS AND ORGANIZE THEM FOR THE TRANSMISSION TO THE PC VIA USB INTERFACE. WHEN THE PC FINALLY GETS THE SIGNALS, IT MAKES A FINAL IMPROVEMENT ON THIS SO THEY'RE READY TO BE SHOWN AND ADDING A TOOL FOR REGISTER DATA ON A EXCEL FILE DEPENDING ON THE USER'S NEEDS.

THE TEST MADE ALLOWED COMPARING BOTH SYSTEMS RESULTS, THE ELECTRONIC ONE AND THE PREVIOUS, IT SHOWS A SIMILAR DATA OBTAINED, BUT REALIZING THE FACT THAT THE ELECTRONIC SYSTEM PRESENTS A MAJOR FIABILITY AND PRECISION OVER THE OTHER SYSTEM THUS THE HUMAN FACTOR WAS DELETED AT ALL, AND GUARANTY THAT ALL MEASURES WILL BE DONE WHIT THE SAME CHARACTERISTICS.

## INTRODUCCIÓN

Es difícil imaginar en la actualidad, la existencia de una industria moderna sin un completo sistema de instrumentación y control. La medición de los distintos parámetros que intervienen en un proceso de fabricación o transformación industrial es básica para obtener un control directo sobre los productos y poder mejorar su calidad y competitividad. Así pues, el conocimiento del funcionamiento de los instrumentos de medición y de control, y su papel dentro del proceso que intervienen, es básico para quienes desarrollan su actividad profesional dentro de este campo.

En el desarrollo de equipos industriales se utilizan transductores y sensores para obtener señales primarias con el objetivo de convertirlas en corrientes estándar, voltajes analógicos y salidas digitales para el procesamiento y tratamiento con ayuda de la electrónica analógica y digital. No se puede hablar de los sensores, como componentes electrónicos básicos, sin ver cómo se pueden adaptar a un sistema de adquisición y control. Por lo que se tendrán que investigar las nuevas tecnologías de adaptación de estos sensores que como parte de una cadena de dispositivos, forman un sistema.

La instrumentación electrónica es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un sistema de control, a un operador humano o a ambos y es en este punto donde podemos abarcar el ámbito del diseño de la Instrumentación virtual, la cual expande las capacidades de una instrumentación convencional ya que la información se puede almacenar y procesar desde un computador y éste es ampliamente escalable. Los datos obtenidos de un sistema físico se pueden procesar para ser graficados, utilizados con fines de control y muchas otras aplicaciones. Gracias a la instrumentación virtual y a los avances en el ámbito de comunicaciones electrónicas, la información obtenida puede ser procesada remotamente, lo cual permite controlar diversos procesos desde prácticamente cualquier parte.

En el desarrollo de este trabajo, se busca la implementación de un sistema de medida acorde con las necesidades presentadas en el campo de aplicación, de este modo ofrecer al usuario un modelo de trabajo más confiable, exacto y que represente la información de manera accesible y fácil de entender.

## 1. CONCEPTOS BASICOS

### 1.1. DESCRIPCION DE LA MAQUINA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO

1.1.1. Propósito de estudio de la máquina de transporte de mezclas sedimentadas y no sedimentadas. El objetivo principal de la investigación en la máquina de transporte hidráulico es estudiar las pérdidas de energía y velocidad crítica de depósito en canales abiertos de mezclas sedimentables, así como descubrir los efectos de los sólidos no sedimentables en el agua, lo cual permitirá saber con certeza la velocidad mínima de diseño en los sistemas de transporte de agua.

El diseño del prototipo permite medir las variables necesarias para desarrollar el problema de transporte de mezclas sedimentables en canales abiertos y también se utiliza en el estudio de transporte de mezclas no sedimentables.

La importancia del proyecto se debe a la poca investigación respecto al transporte de sólidos en canales abiertos, el estudio de su comportamiento puede ayudar a resolver problemas de medio ambiente, aplicaciones específicas en la industria de la minería y otras actividades donde sea necesario un control adecuado de los sedimentos como el desarrollo de sistemas de alcantarillado auto-limpiantes que eviten el taponamiento de sumideros y además ahorro en los costos por mantenimiento.

1.1.2. Esquema y descripción de la máquina de transporte de mezclas sedimentadas y no sedimentadas. El equipo de laboratorio está dispuesto para la circulación de mezcla de agua-sólidos sobre un canal de ensayo, lo cual implica el uso de una bomba de rotor semiabierto que tiene la capacidad de circular este tipo de mezclas, además la inclusión de variables en la investigación tales como pendiente, caudal, densidad, y área transversal del canal.

A continuación se indica en el esquema de la máquina de transporte hidráulico de mezclas sedimentadas y no sedimentadas (figura 1).

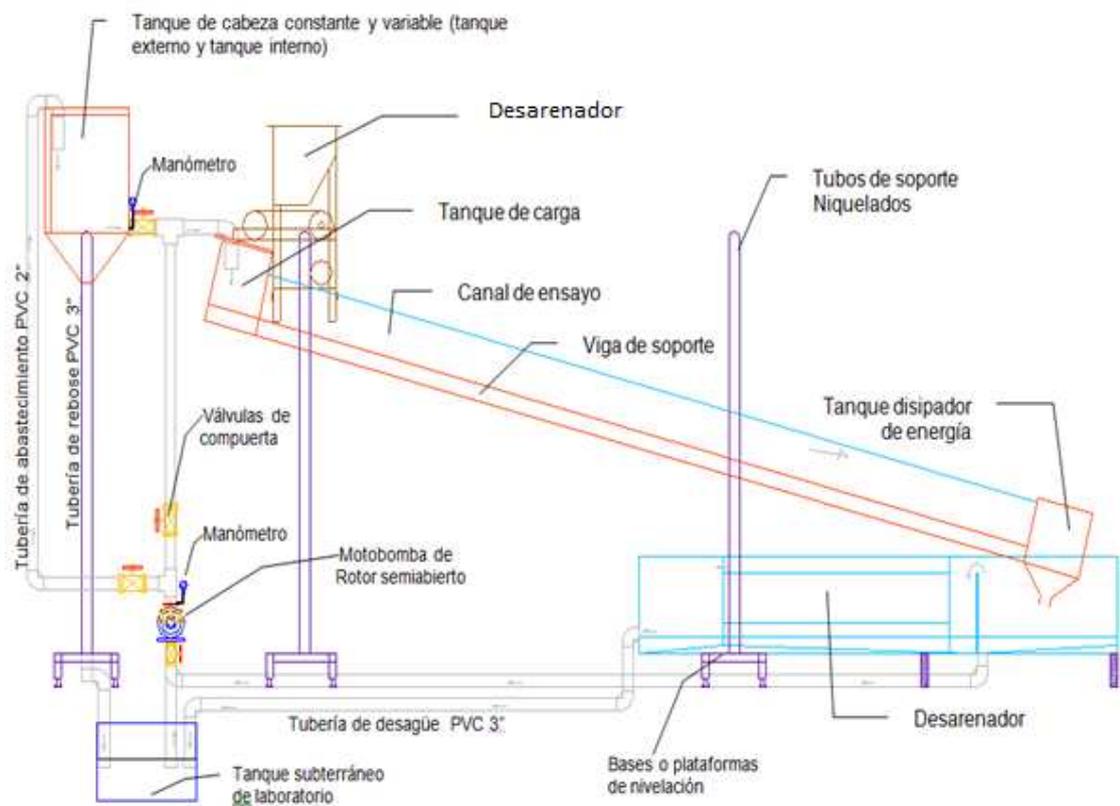


Figura 1. Esquema de la máquina de transporte de mezclas sedimentadas y no sedimentadas

El montaje de laboratorio cuenta con un tanque de cabeza constante, un sedimentador de placas inclinadas y un dosificador de sedimento, que permitirán el estudio de mezclas con sedimentos de mayor diámetro conocidos como sedimentables.

1.1.3. Descripción de los elementos del equipo. A continuación se describen los elementos que conforman la máquina:

#### TANQUE PARA ALMACENAMIENTO A CABEZA CONSTANTE O TANQUE INTERNO.

Se encuentra dentro del tanque externo su alto es de 0.71m, ancho de 0.5m y largo de 0.55m, se une al tanque externo a través de tornillos y está asentado sobre una parilla fabricada con ángulos metálicos.

#### TANQUE EXTERNO.

Su alto es de 0.76 m, ancho de 0.6 m y largo de 0.6 m. y se ubica a una altura de 2.3 m. Tiene algunos aditamentos como son un niple de 3 pulgadas que sirve como desagüe y dos niples de 1 pulgada que sirven para medir el nivel del agua en el tanque interno por medio de un manómetro y un tubo de vidrio.

#### DOSIFICADOR DE SÓLIDOS.

El equipo está conformado por una tolva por donde se vierte el sedimento y una compuerta que regula la abertura para la salida del material, el sedimento se transporta por una banda que gira a través de un motor que está conectado a un voltaje de 220 voltios. El dosificador se ubica a una altura de 2.23 m.

#### VIGA PARA SOPORTE DEL CANAL.

La longitud total es de 6 m, su ancho es de 0.29 m y alto de 0.1 m. Contiene doce peldaños hechos por los ángulos rectangulares, en sus extremos se pueden ensamblar los tanques de carga y disipador de energía.

#### TANQUE DE CARGA.

En este tanque se acoplarán los diferentes tipos de canales.

#### TANQUE DISIPADOR DE ENERGÍA.

Tiene un alto de 0.37 m, un ancho de 0.3 m y un largo de 0.39 m. Además tiene una tolva con un niple de 2.5 pulgadas que sirve como desagüe. Por el lado en el cual se introduce la viga para soporte del canal se hizo un hueco de ancho igual a 0.2 m y alto de 0.26 m con el fin de introducir parte del canal en este tanque para realizar la descarga.

#### DESARENADOR.

Está constituido por tres cámaras de longitud 1.24 m, 1.66 m y 0.6m las cuales van ubicadas una tras otra. En conjunto el desarenador tiene una longitud de 3.51 m, un ancho de 0.6 m y un alto de 0.57 m. La primera cámara tiene un niple de 2.5 pulgadas el cual envía el agua hacia la motobomba, además tiene una placa de rebose ubicada a 1.05 m y tiene una altura de 0.48 m. La segunda cámara tiene otro niple de 2.5 pulgadas que sirve como desagüe del agua, en la tercera cámara hay dos niples de 2.5 pulgadas; uno envía el agua hacia el tanque de almacenamiento del laboratorio y el otro sirve como desagüe.

#### VÁLVULAS.

Se utilizan tres válvula de compuerta de 2" y dos válvula de compuerta 2 1/2", estas se acoplan a los adaptadores machos de PVC.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Arias Estrella M., Taquez Muñoz E., "Estudio experimental en laboratorio del transporte hidráulico de mezclas no sedimentables de aguasólidos en canales abiertos-segunda parte", Universidad de Nariño 2007.

### MOTOBOMBA.

Tiene una potencia de 3 Hp o 2.2 Kw y su capacidad de bombeo es de 10 lps. Toma el agua de un tanque de laboratorio o desde el desarenador y la sube al tanque para almacenamiento de cabeza constante o tanque interno o la envía directamente hacia el canal. Esta motobomba trabaja a 3430 rpm, con un voltaje de 220 / 440 voltios, su conexión es trifásica y su eficiencia es del 84%.

### CANAL DE ENSAYO

Se está usando un canal de vidrio de 33.4 milímetros de diámetro segmentado en 3 partes de 2 metros cada una, unidas por acoples de teflón.

### 1.2. ELEMENTOS Y MECANISMOS DE MEDICIÓN ACTUALES.

Para efectuar las diferentes mediciones de nivel, caudal, presión e inclinación se utilizan los siguientes elementos:

- Cronometro
- Termómetro
- Trípode
- Tanques Plásticos: Los tanques se utilizan para la determinación del caudal mediante el cálculo de volumen por tiempo (figura 2).



Figura 2. Tanques utilizados para la medición de caudal

- Tablero de medición: El tablero está formado por un acetato que lleva impreso dos reglas con escala en centímetros para registrar la altura de la lámina de agua y un transportador con aproximadamente  $25^\circ$  a cada lado y tiene una precisión de  $0.2^\circ$  y sirve para medir la pendiente del canal. Sobre el tablero se encuentra un cronometro para hacer registro del tiempo (figura 3).

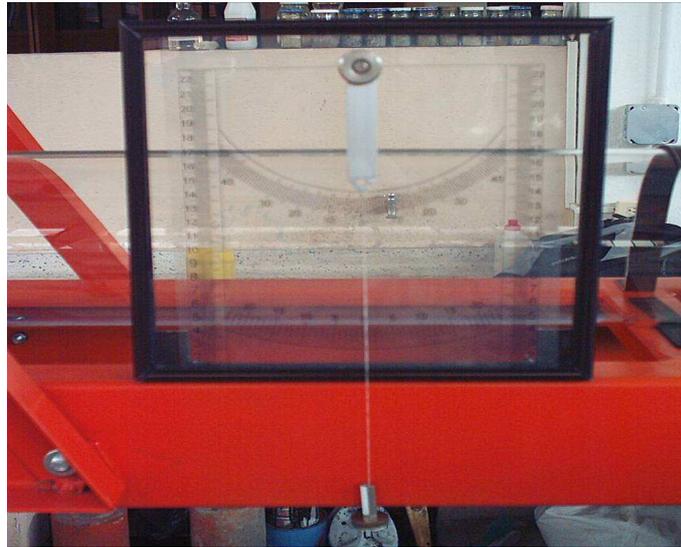


Figura 3. Tablero de medición

- Cámara fotográfica y de video: permite registrar los datos medidos en el tablero de medición para posteriormente ser almacenados en tablas para su estudio.
- Manómetro salida de la bomba: Para medir la presión se utiliza el manómetro de Bourdon, este manómetro está formado por un tubo hueco de sección ovalada curvado en forma de gancho. El manómetro se ubica después de la salida de la bomba para leer la variación de presión que esta produce. Las unidades que tiene el manómetro son bar y PSI
- Manómetro en tanque elevado: Este manómetro se ubica en el tanque elevado de almacenamiento para tomar lectura de la variación del nivel de agua del tanque. La lectura se puede realizar en onzas sobre pulgada cuadrada (OZ/in<sup>2</sup>) o pies de agua (inH<sub>2</sub>O).
- Piezómetro: Tiene un sistema de medida en centímetros y cumple la misma función que el manómetro. En la calibración se buscará que el nivel indicado por el piezómetro sea el mismo que el indicado por el manómetro.

### 1.3. MÉTODOS Y SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

La instrumentación electrónica se encarga del diseño y manejo de los dispositivos electrónicos, para su uso en mediciones. Se aplica en el censado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos.

Para realizar el desarrollo de una instrumentación se deben considerar los siguientes parámetros, condiciones y factores:

- Variable a medir
- Rango
- Precisión requerida
- Repetibilidad requerida
- Ambiente en que se realizará la medición
- Tipo de salida eléctrica requerida
- Ambiente en que se realizará la medición
- Pérdida de carga aceptable
- Presupuesto (debe considerarse no solo el costo del instrumento)
  - Costo del instrumento en sí
  - Costo de la energía necesaria para operarlo
  - Costo de la instalación (adaptación de sistemas de control, paneles, etc.)
  - Costo de mantenimiento
  - Costo de la instrumentación asociada
  - Costo de mano de obra calificada
- Linealidad
- Velocidad de respuesta

En el desarrollo del proyecto se busca realizar mediciones de nivel, presión, caudal e inclinación en la máquina de transporte hidráulico de mezclas sedimentadas y no sedimentadas.

1.3.1. Medición de presión. La presión puede definirse como una fuerza por unidad de área o superficie, en donde para la mayoría de los casos se mide directamente por su equilibrio directamente con otra fuerza conocida. En ingeniería, el término presión se restringe generalmente a la fuerza ejercida por un fluido por unidad de área de la superficie que lo encierra

1.3.1.1. Tipos de presión. A continuación se describen los tipos de presión medibles (figura 4).

### PRESIÓN ABSOLUTA

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

- PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Es la presión ejercida por la atmósfera de la tierra se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). Al nivel del mar o a las alturas próximas a este, el valor de la presión es cercano a  $14.7 \text{ lb/plg}^2$  ( $101,35 \text{ Kpa}$ ), disminuyendo estos valores con la altitud.

- PRESIÓN MANOMÉTRICA

Son presiones superiores a la atmosférica, que se miden por medio de un elemento que define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante

La presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

$$\textit{Presión Absoluta} = \textit{Presión Manométrica} + \textit{Presión Atmosférica}.$$

- VACÍO

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y por lo general se expresa a modo de centímetros de mercurio (cmHg), metros de agua, etc.

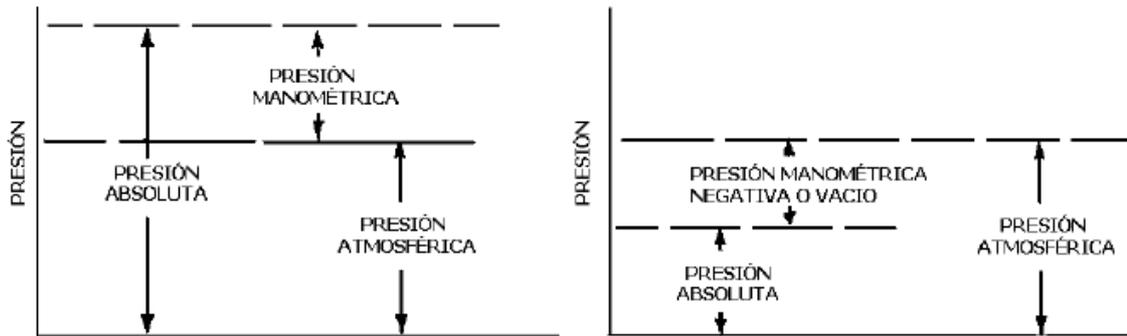


Figura 4. Tipos de Presión

1.3.1.2. Elementos para medición de presión. Los elementos electromecánicos para la medición de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

- Resistivos.
- Magnéticos
- Capacitivos.
- Extensométricos.
- Piezoeléctricos.

#### TRANSDUCTORES RESISTIVOS

Consisten en un elemento elástico (tubo Bourdon o capsula) que varia la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia.<sup>2</sup>

Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

<sup>2</sup>A. Creuss, Instrumentación Industrial, Sexta Edición, Ed. Alfa Omega, Páginas. 193-218

## TRANSDUCTORES MAGNÉTICOS

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento:

### a) Transductores de inductancia variable:

En los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.

Los transductores de inductancia variable tienen las ventajas de no producir rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños y de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje.

### b) Transductores de reluctancia variable

Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.<sup>3</sup>

El movimiento de la armadura es pequeño (del orden de un grado como máximo en armaduras giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura.

Ambos tipos de transductores posicionan el núcleo o la armadura móviles con un elemento de presión (tubo Bourdon, espiral) y utilizan circuitos eléctricos bobinados de puente de inductancias de corriente alterna.

## TRANSDUCTORES CAPACITIVOS

Se basan en la variación de capacitancia que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

---

<sup>3</sup> A. Creuss, Instrumentación Industrial, Sexta Edición, Ed. Alfa Omega, Páginas. 193-218

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de corriente alterna a los que están acoplados.

## GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia que se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensométricas:

- Galgas cementadas formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico.
- Galgas sin cementar en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

En ambos tipos de galgas, la aplicación de presión estira o comprime los hilos según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando pues la resistencia de los mismos.

Una innovación de la galga extensométrica la constituyen los **transductores de presión de silicio difundido**. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así una galga extensométrica autocontenida. El espesor del sensor determina el intervalo de medida del instrumento.

## TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente.

Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero.

1.3.2. Medición de caudal. La medida de caudal, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por un conducto por unidad de tiempo. Los medidores de caudal volumétrico pueden determinar el caudal de volumen de fluido de dos formas:

- Directamente, mediante dispositivos de desplazamiento positivo.
- Indirectamente, mediante dispositivos de: presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, electromagnéticos, etc.

Debido al tipo de estudio que se realiza en la máquina de transporte hidráulico los sensores de caudal de tipo directo no son usados, ya que originan pérdidas de energía que por motivos de la investigación realizada no son aceptados.

1.3.2.1. Elementos de medida para caudal. Los sistemas electrónicos para medir caudal son los siguientes:

#### INSTRUMENTOS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido (figura 5), abordaremos en primer lugar los medidores de presión diferencial. Esta clase de medidores presenta una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

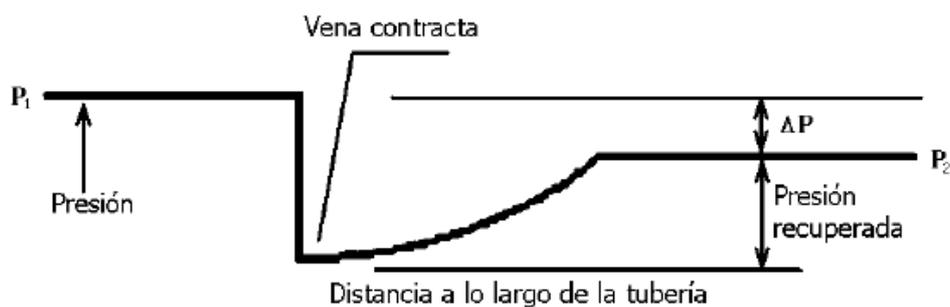


Figura 5. Diagrama del comportamiento en medidores diferenciales

Los medidores de flujo de tipo diferencial generalmente están constituidos por dos componentes: el elemento primario y el elemento secundario. El elemento primario es el dispositivo que se coloca en la tubería para obstruir el flujo y generar una caída de presión.

El elemento secundario mide la caída de presión y proporciona una indicación o señal de transmisión a un sistema de indicación o control

- PLACA DE ORIFICIO.

La placa de orificio consiste (figura 6) en una placa perforada que se instala en la tubería. Con el fin de evitar arrastres de sólidos o gases que pueda llevar el fluido, la placa incorpora, normalmente, un pequeño orificio de purga. Para captar la presión diferencial que origina la placa de orificio, es necesario conectar dos tomas, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa.

Las principales ventajas de dichos medidores son su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles, su funcionamiento se comprende con facilidad, no son caros, particularmente y se comparan con otros medidores y pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos.

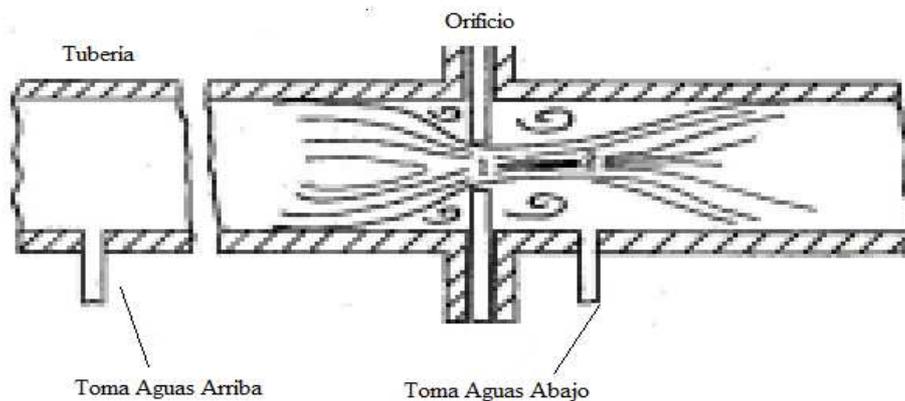


Figura 6. Diagramas de medidor tubo de orificio

Sus principales desventajas son: la amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores, pueden producir pérdidas de carga significativas, la señal de salida no es lineal con el caudal, deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes, pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas, la precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

- TUBO VENTURI

El tubo Venturi clásico (figura 7) está caracterizado por su entrada convergente y salida divergente. La presión interna se mide en su sección de entrada, la cual tiene el mismo diámetro que la tubería. Luego sigue una sección de transición, en la cual el diámetro interno se reduce hasta el diámetro de la sección de la garganta.

La presión estática se mide en la sección de la garganta, la cual se dimensiona para producir un diferencial de presión deseado a una determinada tasa de flujo. En la sección de salida del tubo Venturi, el diámetro de la garganta incrementa gradualmente hasta hacerse igual al diámetro de la tubería. El tubo Venturi se utiliza para medir flujo de líquidos y gases, cuando se quiere minimizar la pérdida de presión. Su medidor puede manejar entre un 25 y 50% mayor flujo que una placa de orificio, para diámetros de tubería y pérdidas de presión comparables.

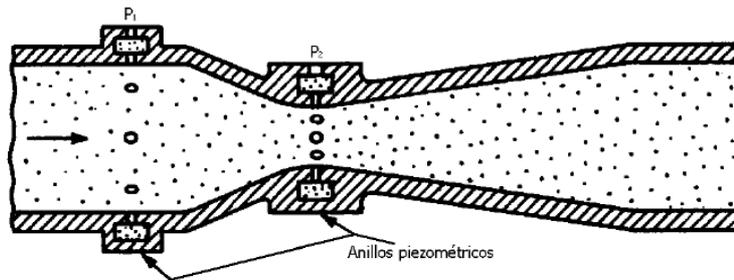


Figura 7. Diagrama medidor tubo de Venturi

- TUBO PITOT

Un tubo Pitot (figura 8) mide dos presiones simultáneamente: presión de impacto ( $P_t$ ) y presión estática ( $P_s$ ). La unidad para medir la presión de impacto es un tubo con el extremo doblado en ángulo recto hacia la dirección del flujo. El extremo del tubo que mide presión estática es cerrado pero tiene una pequeña ranura en un lado. Los tubos se pueden montar separados o en una sola unidad.

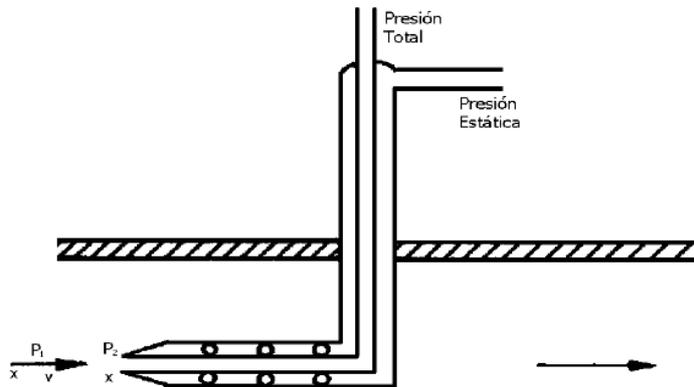


Figura 8. Diagrama medidor Tubo Pitot

## MEDIDORES DE CAUDAL ELECTROMAGNÉTICOS

El medidor de caudal electromagnético (figura 9) utiliza el principio básico que un electrogenerador, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared de la tubería, la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad media del fluido.<sup>4</sup>

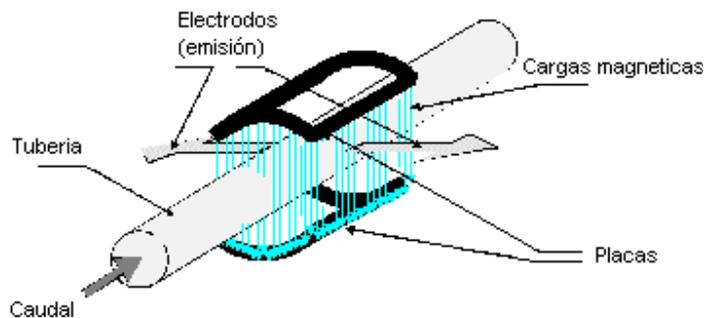


Figura 9. Esquema del sistema de medidor de caudal electromagnético

Este tipo de medidores de caudal pueden ser tanto de corriente alterna como continua, las bobinas crean un campo magnético que atraviesa el tubo por donde circula el fluido. Se

<sup>4</sup> [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/art2/pdf/teoria.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf)

induce un voltaje entre los electrodos, los cuales son ubicados en posiciones donde se genere la máxima diferencia de potencial.<sup>5</sup>

El voltaje de salida es del orden de milivoltios, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada. Este tipo de medición no presenta obstrucciones al flujo.

Este tipo de medidores ofrecen ventajas como que no genera pérdidas de carga, dado que el parámetro censado a través de la tubería es velocidad promedio, se aplica tanto a flujo laminar como turbulento y no depende de la viscosidad. No tiene partes móviles, por lo que es confiable y de bajo mantenimiento. Las principales desventajas es que si el fluido a medir produce depósitos sobre los electrodos, la medición será errónea. Su costo es relativamente alto.

## MEDIDORES ULTRASÓNICOS

Existen 2 tipos de medidores ultrasónicos que son comúnmente utilizados para la medida de caudal.

El primero, tiempo de tránsito o de propagación utiliza la transmisión por impulsos, mientras que el segundo efecto Doppler usa la transmisión continua de ondas.

- Medidores ultrasónicos por impulsos

Los medidores ultrasónicos modulados por impulsos (figura 10) son los más precisos y se utilizan, preferentemente, con líquidos limpios, aunque algunos tipos permiten medidas de líquidos con cierto contenido de partículas y gas. El método diferencial de medida por tiempo de tránsito, se basa en un sencillo hecho físico. Si imaginamos dos canoas atravesando un río sobre una misma línea diagonal, una en el sentido del flujo y la otra en contra del flujo, la canoa que se desplaza en el sentido del flujo necesitará menos tiempo en alcanzar su objetivo; Las ondas ultrasonoras se comportan exactamente de la misma forma.<sup>6</sup>

Se mide la diferencia en tiempo para que le toma a un pulso de sonido para viajar una determinada distancia, primero contra el sentido del flujo del líquido y luego en la dirección de este. Los medidores de este tipo son sensibles a sólidos suspendidos en el fluido o a burbujas de aire.<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> T. Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Gulf Publishing Company, 1986.

<sup>6</sup> [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/art2/pdf/teoria.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf)

<sup>7</sup> T. Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Gulf Publishing Company, 1986.

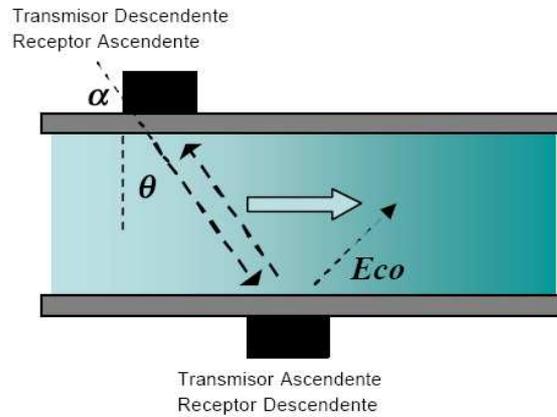


Figura 10. Esquema de un medidor ultrasónico por impulsos

- Medidores ultrasónicos utilizando el efecto Doppler

El efecto Doppler puede entenderse fácilmente si se considera el cambio que se produce en la frecuencia cuando un tren se mueve hacia un observador con su bocina sonando. Cuando el tren se acerca, la bocina es percibida por el observador con una graduación de tono más alta, ya que la velocidad del tren da lugar a que las ondas sonoras sean más próximas que si el tren estuviera parado. De igual manera, si el tren se aleja aumenta el espaciamiento, dando como resultado una graduación de tono o frecuencia más baja. Este aparente cambio en la frecuencia se denomina efecto Doppler y es directamente proporcional a la velocidad relativa entre el objeto móvil, el tren, y el observador.

Los medidores ultrasónicos de tipo Doppler (figura 11) utilizan el concepto de que si se deja pasar el ultrasonido en un fluido en movimiento con partículas, el sonido será reflejado de nuevo desde las partículas. La variación de frecuencia del sonido reflejado será proporcional a la velocidad de las partículas.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> T. Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Gulf Publishing Company, 1986.

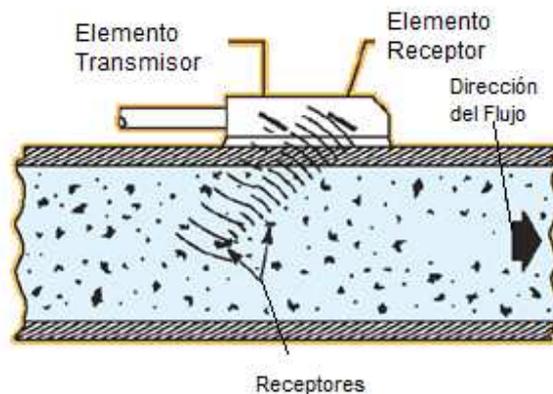


Figura 11. Esquema de un medidor ultrasónico utilizando efecto Doppler

Al igual que en el caso de los medidores magnéticos, los medidores de caudal por ultrasonidos no presentan obstrucciones al flujo, no dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña. Los transductores son incorporados en el cuerpo del medidor, sin necesidad de juntas en contacto con el fluido. No se necesita tubería en derivación ni válvulas de aislamiento, ya que todos los elementos activos pueden reemplazarse sin contacto alguno con el líquido. Su salida es lineal con el caudal que está midiendo.

En contraposición este tipo de sensores no presentan precisión alta, además de que su costo es relativamente alto para instalaciones en tuberías de bajo diámetro.

1.3.3. Medición de nivel. La medición del nivel puede definirse como la determinación de la posición de una interface que existe entre dos medios separados por la gravedad, con respecto a una línea de referencia. Tal interface puede existir entre un líquido y un gas, entre dos líquidos, entre un sólido granulado y un gas, o entre un líquido y su vapor.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

1.3.3.1. Elementos para la medición de nivel. Esta variable puede ser medida mediante los siguientes métodos:

## MEDIDOR MANOMÉTRICO (PRESIÓN HIDROSTÁTICA)

Consiste en un manómetro conectado directamente a la inferior del estanque. El manómetro mide la presión debida a la altura de líquido H que existe entre el nivel del estanque y el eje del instrumento. Así pues, el rango de medida del instrumento corresponderá a:

$$H = \frac{P}{Sg}$$

P: Presión debido a la columna de líquido.

Sg: Gravedad específica del líquido.

H: Altura del nivel.

Como las alturas son limitadas, el rango de medida es bastante pequeño, de modo que el manómetro utilizado tiene un elemento de medida del tipo fuelle. El instrumento sólo sirve para fluidos limpios ya que si el líquido es corrosivo, coagula o bien tiene sólidos en suspensión, el fuelle puede destruirse o bien bloquearse perdiendo su elasticidad; por otra parte, como el rango de medida es pequeño no es posible utilizar sellos de diafragma. La medida está limitada a estanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del líquido.

El método más común para medir nivel con sensores de tipo hidrostático, es utilizando transmisores de diferencial de presión (D/P cell), o transmisores de presión manométrica (gage). En los de diferencial de presión, la presión ejercida por la columna de líquido actúa sobre una celda de diferencial de presión, cuyo movimiento es utilizado para transmitir una señal neumática o electrónica proporcional a la altura del nivel.

## MEDIDOR DE NIVEL CONDUCTIVO O RESISTIVO

Consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor.<sup>9</sup>

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad.

Este tipo de instrumentación es versátil, sin partes móviles, su campo de medida es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. El líquido contenido en el estanque

---

<sup>9</sup> E.B. Jones, Instrument Technology, Vol. 1, Measurement of Pressure, Level and Temperature, Butterworth & Co., 1974.

debe tener un mínimo de conductividad y si su naturaleza lo exige, la corriente debe ser baja para evitar la deterioración del producto. Por otro lado, conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de espuma en caso necesario.

## MEDIDOR DE NIVEL CAPACITIVO

Se mide la capacitancia del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del estanque (figura 12). La capacitancia del conjunto depende linealmente del nivel del líquido. En fluidos conductores el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.<sup>10</sup>

El líquido cuyo nivel se quiere medir actúa como el dieléctrico. A medida que el líquido sube entre el espacio de las dos placas, se produce una variación en la capacitancia la cual se monitorea y se utiliza para dar una señal proporcional al nivel. En esta aplicación de líquidos no conductores la probeta de capacitancia debe estar aislada eléctricamente del tanque.

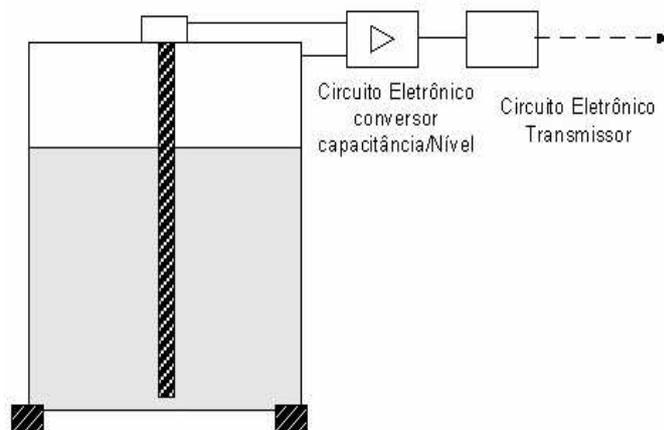


Figura 12. Esquema de un sistema de medida capacitivo de nivel

Este tipo de sensor ofrece ventajas de que requieren mínimo mantenimiento, además pueden ser utilizados para medición continua o puntual. Como desventajas se pueden nombrar que los cambios en la constante dieléctrica del material, causan errores en la señal y normalmente requieren calibración en campo.

<sup>10</sup> [http://www.infopl.net/Documentacion/Docu\\_Instrumentacion/infoPLC\\_net\\_MEDICION\\_DE%20NIVEL.pdf](http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_Instrumentacion/infoPLC_net_MEDICION_DE%20NIVEL.pdf)

## MEDIDOR DE NIVEL ULTRASÓNICO

Se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del estanque (figura 13).

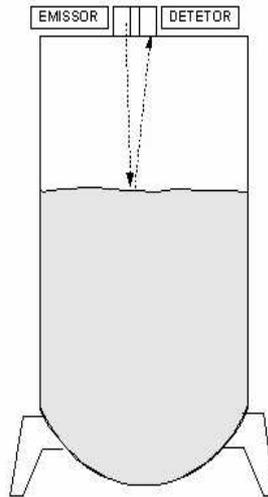


Figura 13. Esquema de funcionamiento de un sistema de medida de nivel ultrasónico

Las ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.

Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida como es el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos.<sup>11</sup>

## MEDIDOR DE NIVEL LÁSER

Se utiliza en aplicaciones donde las condiciones son muy adversas, y donde los instrumentos de nivel convencionales fallan; El sistema consiste en un rayo láser enviado a y dirigido por reflexión en un espejo sobre la superficie. El aparato mide el tiempo que transcurre entre el impulso emitido y el impulso de retorno que es registrado en un fotodetector de alta resolución, y este tiempo es directamente proporcional a la distancia del aparato emisor a la distancia a la superficie del metal en fusión, es decir, da la lectura del nivel.

---

<sup>11</sup> D.M. Considine, *Process Instruments and Control Handbook*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1974.

1.3.4. Medición de inclinación o ángulo. Los siguientes son mecanismos de medición de esta variable:

1.3.4.1. Elementos para medida de ángulo o inclinación.

## POTENCIÓMETROS

Un Potenciómetro es un dispositivo electromecánico que consta de una resistencia de valor fijo sobre la que se desplaza un contacto deslizante llamado cursor y que la divide eléctricamente.

La aplicación más común de los potenciómetros en instrumentación es como sensor de desplazamiento de tipo resistivo. El movimiento del cursor origina un cambio en la resistencia, el cual puede utilizarse para medir desplazamientos lineales o angulares de piezas acopladas al cursor. Los potenciómetros pueden usarse para medir diversas magnitudes físicas siempre que se puedan convertir en desplazamiento.

## INCLINÓMETROS

Un inclinómetro es un instrumento para medir ángulos de pendiente (o inclinación), altitud o la inclinación de un objeto con respecto a la gravedad. Un inclinómetro mide tanto inclinación (pendiente positiva) como declinación (declinación negativa).

Los sensores de inclinación o inclinómetros generar un horizonte artificial y medida angular de inclinación con respecto a este horizonte. Las especificaciones importantes a considerar cuando se buscan sensores de inclinación son el rango de ángulos a trabajar y el número de ejes. Las tecnologías comunes para la implementación de estos sensores son los acelerómetros o las capacitancias líquidas o electrolíticas.

## ENCODER

El encoder es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales. Estos impulsos generados pueden ser utilizados para controlar los desplazamientos de tipo angular o de tipo lineal, si se asocian a cremalleras o a husillos. Las señales eléctricas de rotación pueden ser elaboradas mediante controles numéricos CNC, contadores lógicos programable (PLC), sistemas de control, etc.

La detección del movimiento angular se ejecuta en base al principio de exploración fotoeléctrica. El sistema de lectura se basa en la rotación de un disco graduado con un reticulado radial formado por líneas opacas, alternadas con espacios transparentes. Este conjunto está iluminado de modo perpendicular por una fuente de rayos infrarrojos. El

disco proyecta de este modo su imagen sobre la superficie de varios receptores oportunamente enmascarados por otro reticulado que tiene el mismo paso del anterior llamado colimador. Los receptores tienen la tarea de detectar las variaciones de luz que se producen con el desplazamiento del disco convirtiéndolas en las correspondientes variaciones eléctricas.

La señal eléctrica detectada, para generar impulsos correctamente escuadrados y sin interferencias debe ser procesada electrónicamente. Para incrementar la calidad y estabilidad de las señales, el sistema de lectura se efectuará generalmente de manera diferencial, comparando dos señales casi idénticas, pero desfasadas en 180° eléctricos. Su lectura se efectúa en base a la diferencia de las dos señales, eliminando de este modo las interferencias definidas de modo común porque están superpuestas de igual manera en toda forma de onda.<sup>12</sup>

#### TRANSFORMADOR DIFERENCIAL ROTATORIO (RVDT)

Los RVDT es un tipo de transformador eléctrico usado para la medición de desplazamientos angulares. Se compone de un transductor electromecánico el cual proporciona una señal de salida de en voltios (AC) la cual es linealmente proporcional al desplazamiento angular al cual se está realizando la medición.

Los RVDT utilizan tecnologías *brushles o de no contacto*, para mejorar el tiempo de vida del sistema y la fiabilidad de este. La mayoría de los RVDT están compuestos por un bobinado, un estator laminado y un rotor de dos polos. El estator, contiene tanto el bobinado principal como el secundario.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> <http://bc.inter.edu/facultad/arincon/encoderIncrementales.pdf>

<sup>13</sup> [http://www.infopl.net/Documentacion/Docu\\_Instrumentacion/infoPLC\\_net\\_Medida\\_Desplazamiento.pdf](http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_Instrumentacion/infoPLC_net_Medida_Desplazamiento.pdf)

## 2. PRUEBAS Y SELECCIÓN DE LOS SENSORES A UTILIZAR EN LA INSTRUMENTACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, las mediciones e instrumentación que comprende este trabajo se enfocan a las variables de presión, caudal, inclinación y nivel en la máquina de transporte hidráulico de mezclas sedimentadas y no sedimentadas; después de estudiar la teoría de los distintos tipos de medidores y sensores para realizar la instrumentación de la cual se presenta un resumen en el anterior punto, se realizó un análisis de la efectividad y asequibilidad de cada uno de los tipos de sensores que podrían servir para los propósitos del proyecto, después de la selección basados en la teoría se eligieron y probaron diferentes tipos de estos para cada una de las medidas a realizar.

### 2.1. SENSOR DE DISTANCIA SHARP GP2D120

El sensor GP2D120 de Sharp (figura 14) es un dispositivo de reflexión por infrarrojos con medidor de distancia proporcional al ángulo de recepción del haz de luz que incide en un sensor lineal integrado.



Figura 14. Sensor de distancia Sharp GP2D120

2.1.1. Funcionamiento. El dispositivo emite luz infrarroja por medio de un led emisor de IR, esta luz pasa a través de una lente que concentra los rayos de luz formando un único rayo lo más concentrado posible para así mejorar la directividad del sensor, la luz va recta hacia delante y cuando encuentra un obstáculo reflectante rebota y retorna con cierto ángulo de inclinación dependiendo de la distancia, la luz que retorna es concentrada por otra lente y así todos los rayos de luz inciden en un único punto del sensor de luz infrarroja que contiene en la parte receptora del dispositivo. Este sensor es un CCD lineal y dependiendo del ángulo de recepción de la luz incidirá esta en un punto otro del sensor pudiendo de esta manera obtener un valor lineal y proporcional al ángulo de recepción del haz de luz.

La tensión de salida varía de forma no lineal (figura 15) cuando se detecta un objeto en una distancia entre 4 y 30 centímetros. El sensor actualiza su salida cada 32 milisegundos aproximadamente.

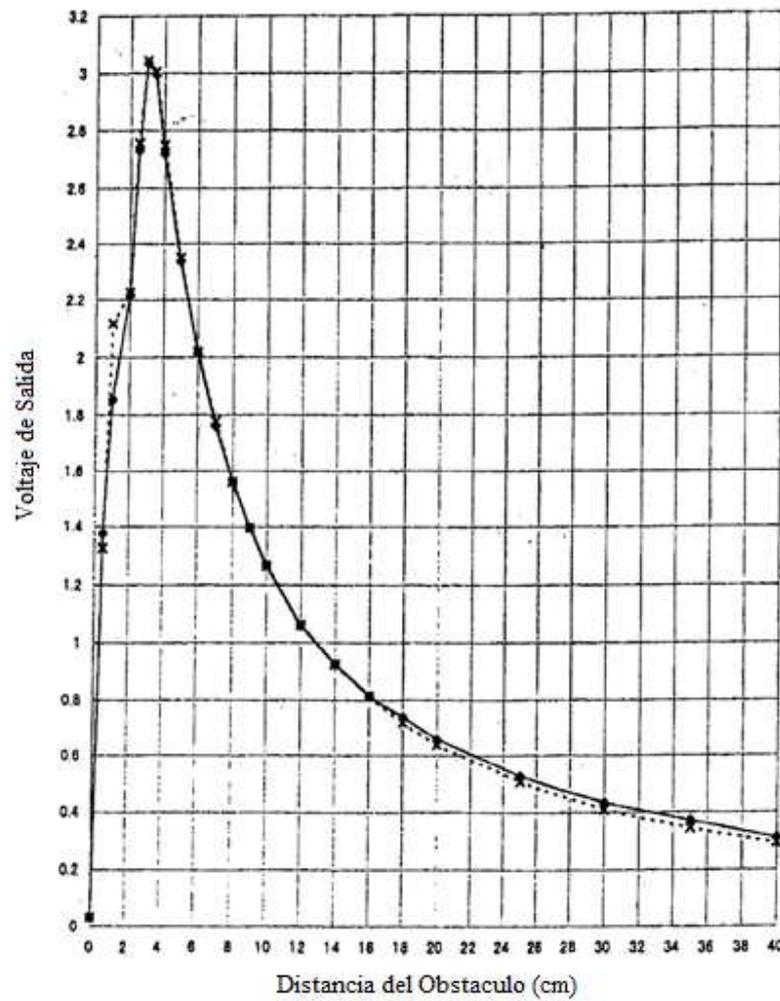


Figura 15. Tensión de salida voltaje vs distancia sensor de distancia GP2D120

La información de la distancia se extrae midiendo el ángulo recibido (figura 16). Si el ángulo es grande, entonces el objeto está cerca (el triángulo es ancho). Si el ángulo es pequeño significa que está lejos (el triángulo es largo y, por tanto, delgado). A continuación se observa este comportamiento:

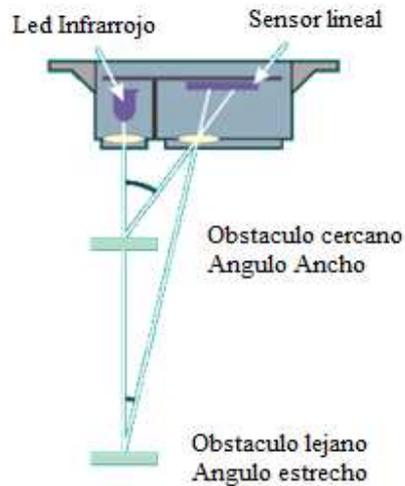


Figura 16. Esquema de funcionamiento del sensor de posición GP2D120

El LED infrarrojo emite el haz de luz a través de una pequeña lente convergente que hace que el haz emisor llegue de forma paralela al objeto. Cuando la luz choca con un obstáculo, una cierta cantidad de luz se refleja, si el obstáculo fuera un espejo perfecto, todos los rayos del haz de luz pasarían y sería imposible medir la distancia. Sin embargo, casi todas las sustancias tienen un grado bastante grande de rugosidad de la superficie que produce una dispersión hemisférica de la luz (reflexión no teórica). Alguno de estos haces de ésta luz rebota hacia el sensor que es recibida por la lente.

La lente receptora también es una lente convexa, pero ahora sirve para un propósito diferente, actúa para convertir el ángulo de posición. Si un objeto se pone en el plano focal de una lente convexa y los otros rayos de luz paralelos en otro lado, el rayo que pasa por el centro de la lente atraviesa inalterado o marca el lugar focal. Los rayos restantes también enfocan a este punto.

En el plano focal hay un Sensor Detector de Posición (PSD). Éste dispositivo semiconductor entrega una salida cuya intensidad es proporcional a la posición respecto al centro (eficaz) de la luz que incide en él. El rendimiento del PSD en la salida es proporcional a la posición del punto focal. Esta señal analógica tratada es la que se obtiene a la salida del sensor.

2.1.2. Pruebas y parámetros de escogencia. Por las características presentadas por este sensor, se decidió realizar pruebas en mediciones de nivel en el canal e inclinación del mismo.

Las pruebas para la medición de nivel en el canal dependían en gran medida de que el sensor fuera capaz de detectar el nivel del líquido (agua) a través del vidrio del cual está hecho este, y no que detectará únicamente el entorno del canal para lo cual el sensor mostró un buen comportamiento detectando variaciones en el nivel del líquido sin verse afectado completamente por el vidrio.

En la medición de inclinación, se usó este sensor solidario al canal apuntando a una referencia vertical, de tal modo que la inclinación del canal se traduce en una diferencia de distancia del sensor respecto a su referencia, de este modo se puede utilizar una sencilla herramienta trigonométrica para determinar el ángulo al cual se encuentra el canal.

Este sensor presenta una menor influencia del color de los objetos reflexivos lo que fue parte fundamental para su escogencia tanto en medición de nivel como inclinación. Además que los sistemas ópticos ofrecen mejor precisión debido a que la longitud de onda involucrada es más corta y a que presentan menor sensibilidad a condiciones ambientales. Su costo es bajo.

## 2.2. SENSORES DE PRESIÓN MPX2050GP

El sensor MPX2050GP (figura 17) es un dispositivo piezorresistivo que proporciona una salida altamente exacta y lineal de voltaje, directamente proporcional a la presión aplicada. El sensor es un diafragma monolítico de silicio con una galga de tensión y una pequeña red de resistencias integradas en el chip, también tiene un sistema de auto-calibración que asegura un alcance definido y evita variaciones de offset debido a la temperatura.

2.2.1. Funcionamiento. En los sensores electrónicos en general, la presión actúa sobre una membrana elástica, midiéndose la flexión. Para detectarla pueden aprovecharse diversos principios físicos, tales como inductivos, capacitivos, piezorresistivos, ópticos, monolíticos u óhmicos (mediante cintas extensométricas).

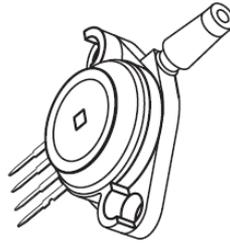


Figura 17. Sensor de presión MPX2050GP

El sensor de presión piezorresistivo tiene un elemento de medición en forma de placa con resistencias obtenidas por difusión o implantación de iones (figura 18). Si estas placas se someten a una carga, cambia su resistencia eléctrica, lo que genera un cambio en el voltaje de salida proporcional a la presión medida

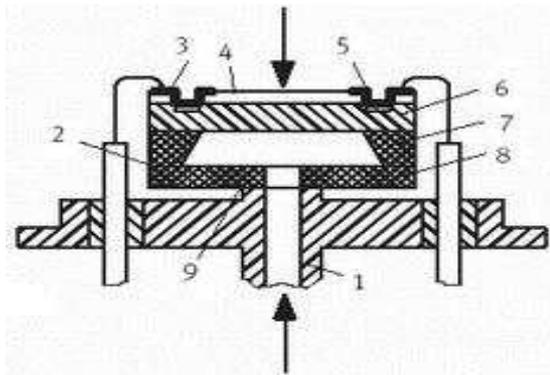


Figura 18. Diagrama interior del sensor de Presión MPX2050GP

- (1) Cuerpo del sensor
- (2) Capa de unión
- (3) Contacto de aluminio
- (4) Pasivación
- (5) Piezorresistencia
- (6) Capa epitaxiada
- (7) Sustrato de silicio
- (8) Soporte de vidrio
- (9) Capa de unión metálica

El sensor entrega una salida de 0 a 4 mV equivalentes de 0 a 50 kPa (0 a 7.25 psi). Es alimentado a 10 V, pero es capaz de soportar 16 V, así como 200 kPa (29 psi), aunque en rangos superiores a 50kPa el fabricante no garantiza el funcionamiento correcto del dispositivo. Posee una sensibilidad de 0.8 mV por kPa, este dispositivo tiene un tiempo de respuesta de 1 ms.

2.2.2. Pruebas y parámetros de escogencia. Este sensor presenta un diseño perfecto para las mediciones tanto de presión y caudal que se necesitan en la máquina de transporte hidráulico ya que tanto a lo largo del canal como en las tuberías cercanas a la motobomba se encuentran instalados medidores de columna de líquido o piezómetros, de tal forma que haciendo una derivación se puede adecuar este sensor al montaje, manteniendo el sistema actual de medida y de este modo corroborar los datos obtenidos en la adquisición electrónica.

El hecho de que el sensor MPX2050GP posea una salida lineal de voltaje respecto a la presión medida es de gran ventaja a la hora de digitalizar estos datos, ya que la calibración requiere muy pocos ajustes, además el rango de presión ofrecido es suficiente para el trabajo que se realiza en la máquina de transporte hidráulico contando además con el hecho de que puede soportar presiones de hasta 200kPa, lo cual asegura que puede trabajar con una regularidad aceptable.

### 2.3. SENSORES ULTRASONICOS 40TR12B

Los medidores ultrasónicos de distancia son básicamente un sistema de sonar, que interpreta los ecos de las señales emitidas y traduciendo el tiempo en que se demoran estos en regresar en una medida de distancia.

2.3.1. Funcionamiento. El principio de funcionamiento se basa en un emisor el cual envía un tren de pulsos ultrasónicos con una frecuencia en el orden de los 38 a 45 KHz; y un receptor espera el rebote de esta señal (figura 19). Se mide el tiempo entre la emisión y el retorno, lo que da como resultado la distancia entre el emisor y el objeto donde se produjo el rebote. Esta medición se calcula teniendo en cuenta la velocidad del sonido en el aire, que si bien varía según algunos parámetros ambientales, como la presión atmosférica, igualmente permite una medición bastante precisa.

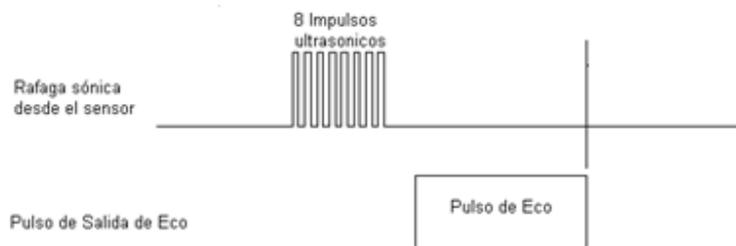


Figura 19. Diagrama de funcionamiento del sensor ultrasónico.

Se pueden señalar dos clases de medidores, los que tienen un emisor y un receptor separados, y los que alternan la función, por medio de un circuito de conmutación, sobre un mismo emisor/receptor piezoeléctrico.

La distancia al reflector puede ser estimada indirectamente mediante la fórmula

$$d = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_f,$$

Donde  $v$  representa la velocidad del sonido en el medio de transmisión y  $t_f$  el tiempo de vuelo. La exactitud en la medición de distancias mediante esta técnica depende del conocimiento de la velocidad y de la correcta estimación del tiempo de vuelo. Ya que la velocidad del sonido en el aire muestra una dependencia casi lineal con la temperatura, por lo que puede ser fácilmente determinada y si es necesario compensada.

Se diseñó un sistema de detección mediante el método del umbral para determinar de este modo el tiempo de vuelo de la onda, en el cual el tiempo de llegada es computado cuando el eco recibido traspasa por primera vez un cierto nivel de amplitud dado.

La etapa de emisión consiste en un generador de ondas que opera a 40KHz que alimenta al emisor, para la recepción el microcontrolador empieza un conteo una vez se ha enviado los pulsos de emisión, se dispone de un filtro pasa bajo que elimina posibles ruidos del ambiente, posteriormente se implementa una etapa amplificadora para que la señal pueda ser trabajada en la etapa de detección de umbral la cual está formada por un circuito de comparación, que toma la envolvente de la señal y la compara con un nivel prefijado, cuando éste nivel es superado, indica que el eco reflejado en un obstáculo ha sido capturado; el circuito comparador entrega entonces un voltaje de uno lógico "1" para que de este modo sea entendido por un microcontrolador y detenga el conteo y se tenga la medida proporcional del tiempo de vuelo de la señal a la distancia.

2.3.2. Pruebas y parámetros de escogencia. Este sensor fue principalmente utilizado en la medición de distancias y dependiendo de su funcionamiento se pensó en utilizarlo para mediciones de caudal y nivel. Las pruebas resultaron en que aunque funciona de forma muy correcta, las medidas, es muy susceptible a las interferencias del medio ambiente tales como atenuación o sensibilidad a la temperatura o humedad, y ya que en el laboratorio donde se encuentra la máquina de transporte hidráulico existen diversas fuentes de ruido se tomó la decisión de no utilizar este tipo de sensor

#### 2.4. SENSOR CAPACITIVO SC12MM

Los sensores capacitivos pueden detectar materiales conductores y no conductores, en forma líquida o sólida. La función del detector capacitivo consiste en señalar un cambio de estado, basado en la variación del estímulo de un campo eléctrico. Los sensores capacitivos detectan objetos metálicos, o no metálicos, midiendo el cambio en la capacitancia, la cual depende de la constante dieléctrica del material a detectar, su masa, tamaño, y distancia hasta la superficie sensible del detector.

2.4.1. Funcionamiento. Los detectores capacitivos están contruidos en base a un oscilador RC. Debido a la influencia del objeto a detectar, y del cambio de capacitancia, la amplificación se incrementa haciendo entrar en oscilación el oscilador. El punto exacto de ésta función puede regularse mediante un potenciómetro, el cual controla la realimentación del oscilador. La señal de salida del oscilador alimenta otro amplificador, el cual a su vez, pasa la señal a la etapa de salida. Cuando un objeto conductor se acerca a la cara activa del detector, el objeto actúa como un condensador.

2.4.2. Pruebas y parámetros de escogencia. Este sensor presenta un perfecto funcionamiento en la detección de nivel de un líquido pero su rango de detección es solo de 5 mm lo cual para la aplicación que se quiere trabajar es insuficiente. Se estudió la posibilidad de construir un sensor de tipo capacitor de placas paralelas, el cual detectara el cambio de nivel del agua representando un cambio en la capacitancia para esta función en especifico, pero el tamaño de las placas a usar debía ser muy grande para obtener una variación significativa en relación a la variación de nivel que se tiene en el laboratorio, por lo tanto también se descarto esta posibilidad.

### 3. IMPLEMENTACION DE LOS SENSORES

Como se ha descrito previamente, las variables a medir pueden ser captadas de la mejor forma a través de sensores de presión de tipo piezorresistivos y sensores ópticos infrarrojos.

#### 3.1. SENSORES OPTICOS

Los sensores ópticos de referencia GP2D120 entregan un voltaje proporcional a la distancia de un objeto, y son ideales para la medición de la inclinación y el nivel en el canal que transporta las mezclas.

3.1.1. Nivel. El haz de luz del emisor infrarrojo del sensor óptico GP2D120 es capaz de atravesar el vidrio del canal de ensayo; esto es muy importante para obtener reflexión en la columna de agua contenida. Esta reflexión se debe a que este haz de luz pierde energía en el vidrio y el obstáculo más cercano de choque es el agua.

De este modo la diferencia entre el diámetro conocido del canal del ensayo, la distancia obtenida por el sensor entre la columna de agua y el receptor infrarrojo y la distancia de calibración (distancia entre el sensor y el canal), proporciona la medida de la columna de agua dentro del canal (figura 20).

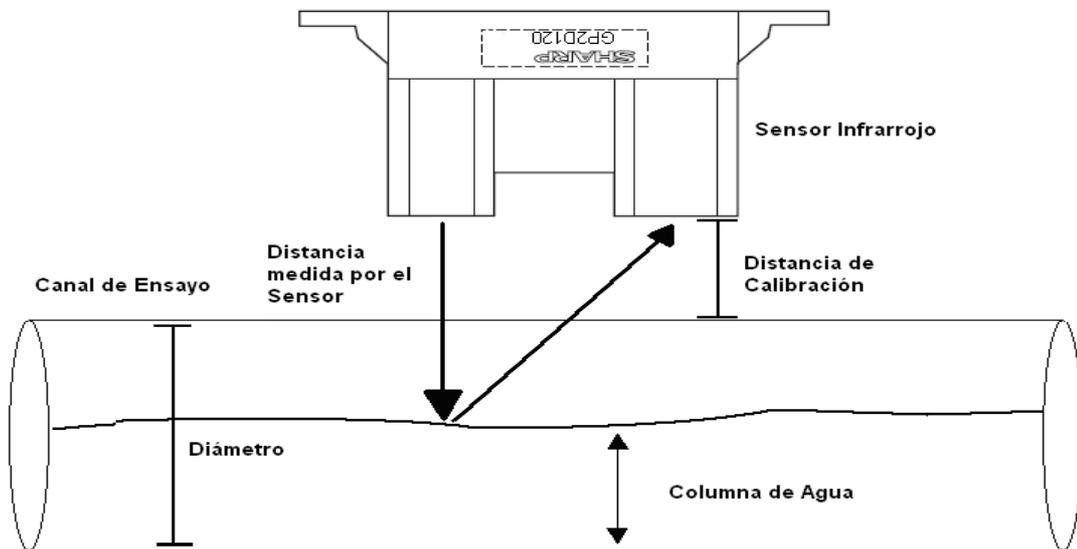


Figura 20. Disposición del sensor óptico GP2D120 en el canal.

3.1.2. **Inclinación.** La medición de pendiente se hace aprovechando la inclinación de la viga de soporte del canal respecto a la normal con el piso.

El sensor óptico escogido, debe ser instalado en paralelo a la viga de soporte logrando que este también se incline. Perpendicular a la viga cuando tiene cero grados de inclinación, se instala una lámina ubicada en un soporte sujeto al piso. De esta manera, cuando la viga se incline, la distancia entre la lámina y el sensor cambia. La distancia medida por el sensor cuando la viga está inclinada cero grados, es la distancia de calibración base para la medida de cualquier inclinación en función de la distancia.

El desplazamiento de la viga de soporte es proporcional a la distancia de reflexión obtenida por el sensor, esta distancia determina el ángulo de inclinación del canal de ensayo.

En la siguiente gráfica (figura 21), se muestra la disposición del sensor y la lámina, además de la distancia de calibración cuando existen cero grados de inclinación.

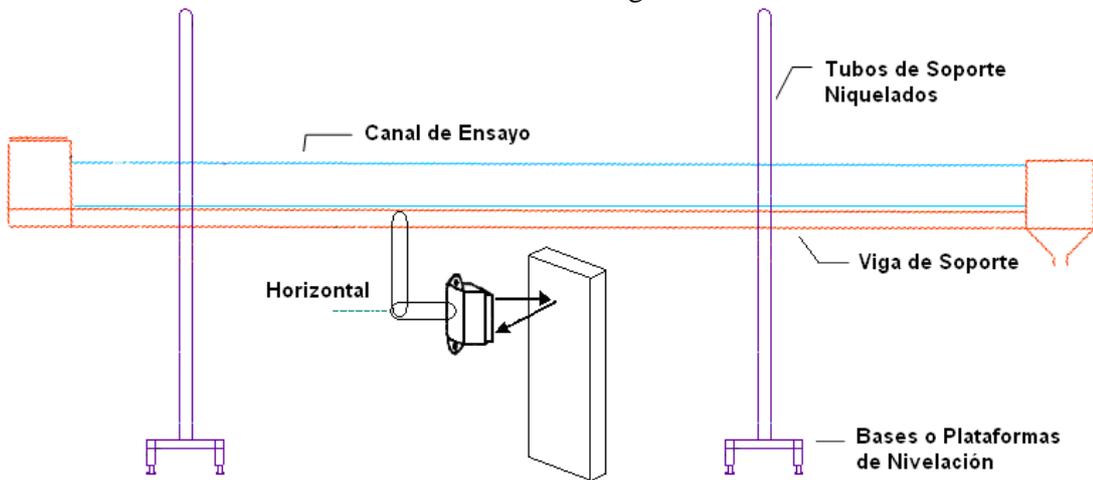


Figura 21. Disposición del sensor óptico GP2D 120 para medir inclinación.

En la figura 22, se observa el cambio en la distancia entre el sensor y la lámina cuando existe inclinación en la viga.

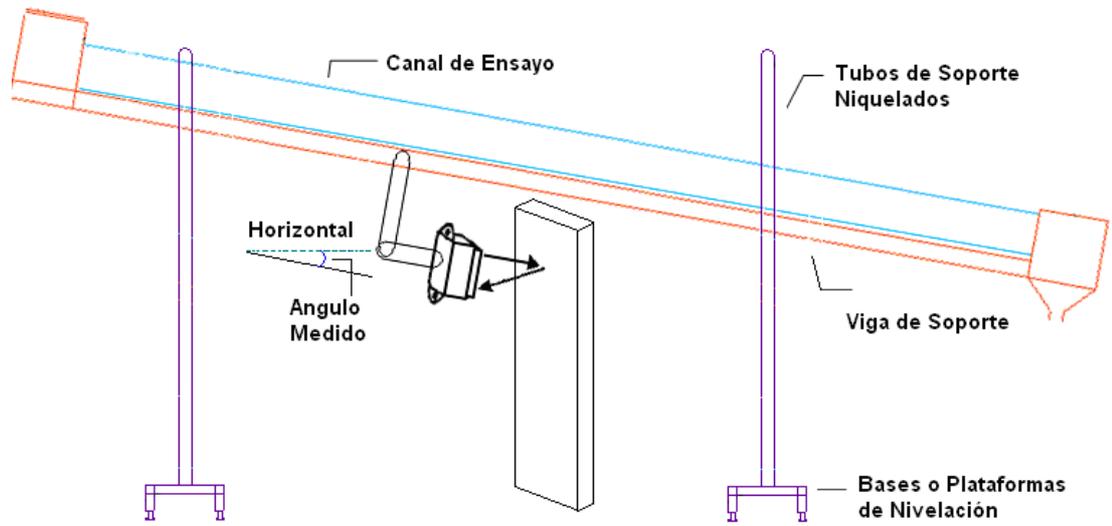


Figura 22. Inclinación del canal.

En la siguiente gráfica (figura 23), se muestra el incremento de la distancia para una inclinación mayor.

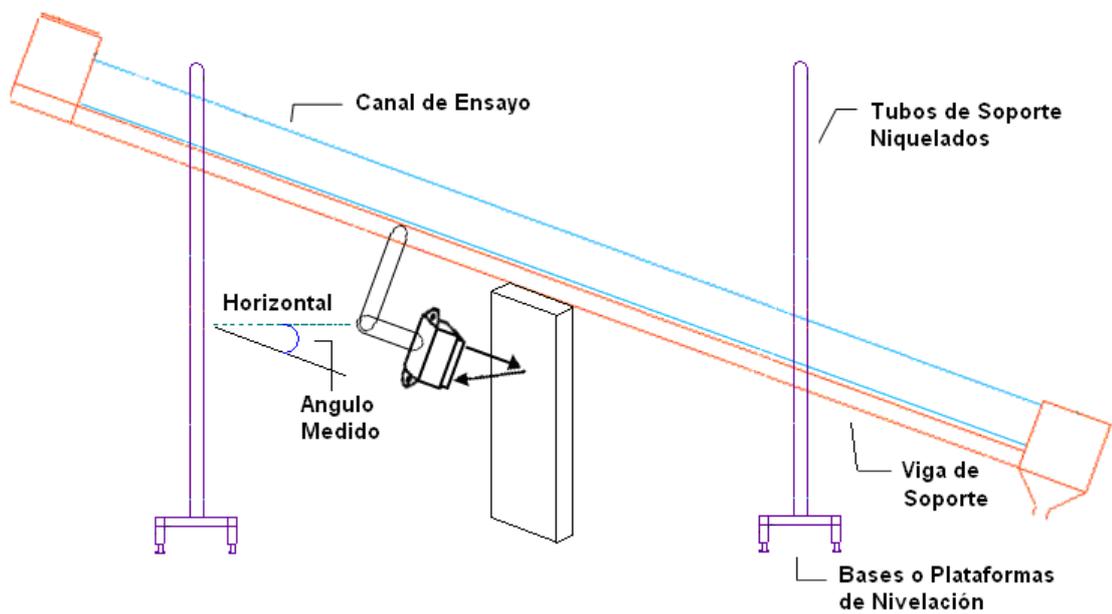


Figura 23 .Incremento de la Inclinación del canal.

Para una inclinación de sentido contrario a las anteriormente mostradas, se observa en la siguiente gráfica como la distancia entre el sensor y la columna es menor que la distancia de calibración. De esta manera se determina que para ángulos positivos la distancia entre el sensor y la lámina es menor a la distancia de calibración y para ángulos negativos sucede lo contrario (figura 24).

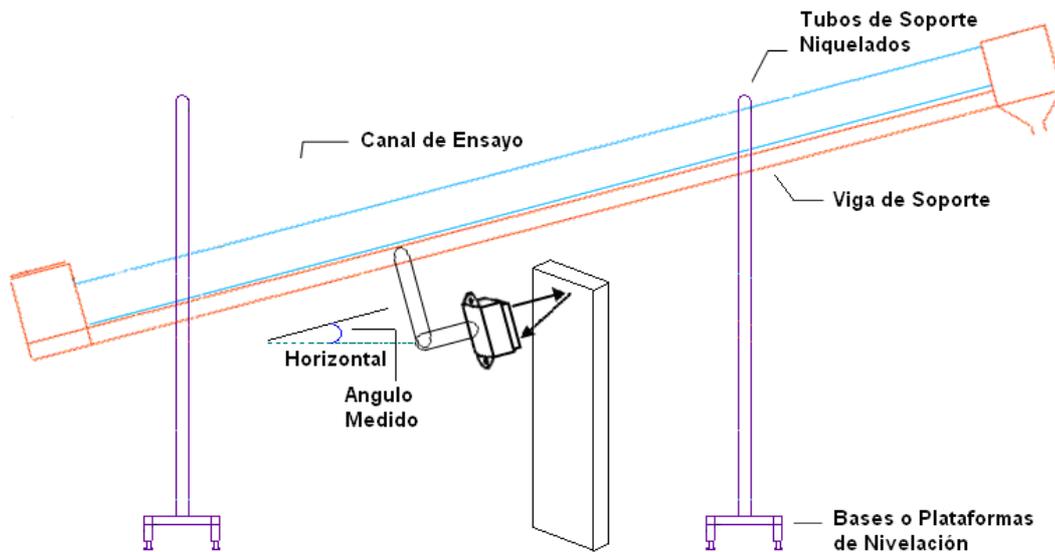


Figura 24. Inclinación positiva del canal

### 3.2. SENSORES DE PRESIÓN

Los sensores piezorresistivos de presión de referencia MPX2050GP son ideales para la medida directa e indirecta de muchas variables de interés en sistemas con fluidos. Con la medida de presión en diversos puntos de la máquina de transporte hidráulico es posible la medida de caudal e incluso de nivel.

3.2.1. Presión. La presión puede ser medida en cualquier punto donde sea posible hacer una derivación para ser colocado el sensor MPX2050GP.

Es muy importante conocer la presión en el canal de transporte en diversos puntos, estas medidas facilitan el estudio de pérdida de energía del transporte de mezclas, propósito de la construcción de la máquina. De esta manera aprovechando las derivaciones existentes en los canales, dispuestas para realizar las mediciones análogas de presión, se han acoplado los sensores de presión manométricos MPX2050GP los cuales se ven afectados directamente por la presión de la mezcla. Estos sensores responden con una salida de voltaje lineal al

aumento o disminución de presión en el canal. En la siguiente gráfica (figura 25)., se muestra la ubicación de los sensores en el canal.

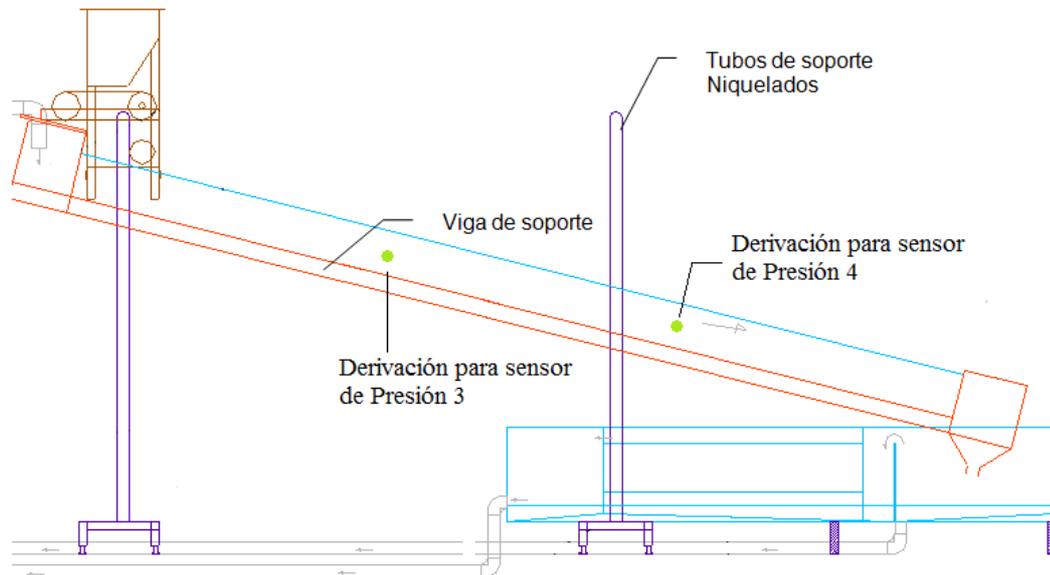


Figura 25. Disposición de los sensores de presión en el canal.

3.2.2. Caudal. Para esta variable se aprovecha el que se pueda medir las presiones de agua existentes en dos puntos cercanos en los cuales exista un estrechamiento conocido. El caudal se mide a través de una fórmula que aprovecha estas variables.

La presión diferencial es medida a través de dos sensores como se indica en la figura 26. Los sensores son ubicados en derivaciones existentes en las tuberías que alimentan el canal.

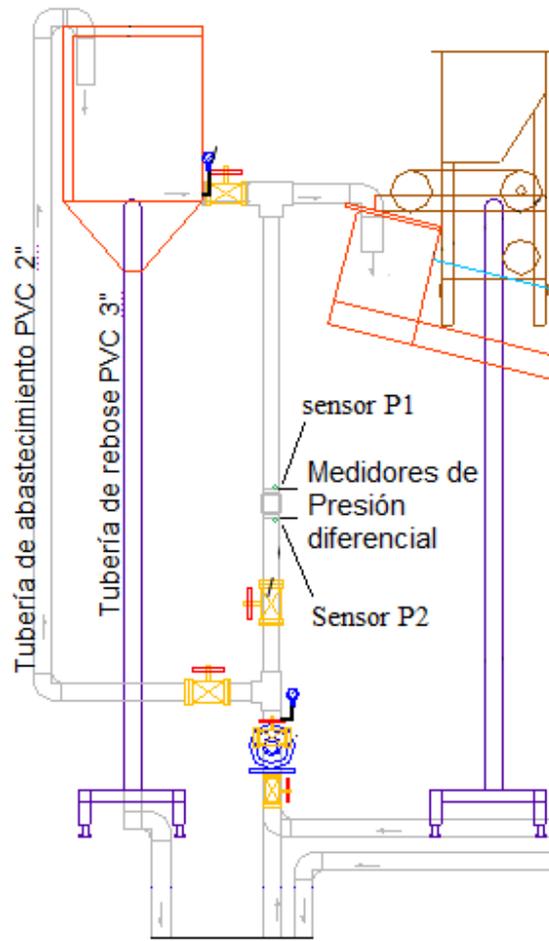


Figura 26. Ubicación de sensores de presión para medir caudal.

#### 4. ACONDICIONADORES DE SEÑAL

La etapa de acondicionamiento de señales se hizo mediante *hardware* y *software*. En la parte de *hardware* se utilizó un amplificador de instrumentación para cada sensor. El amplificador utilizado fue el AD620, cuyas características son las siguientes.

El AD620 es un amplificador diferencial, el cual entrega una señal de voltaje DC que es la resta de sus dos entradas, además realiza la amplificación que se necesite.

Los amplificadores de instrumentación AD620, requieren una única resistencia externa ( $R_G$ ) que determina la ganancia a la cual se quiere trabajar, esta ganancia puede variar desde 1 hasta 1000. El amplificador posee un voltaje offset de 50uV que no afectan en las mediciones realizadas.

La ganancia dada por el amplificador se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Ganancia} = \frac{49400\Omega}{R_G} + 1$$

Las amplificaciones requeridas para cada sensor son distintas debido a las necesidades de calibración expuestas.

##### 4.1. ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA SENSORES DE PRESIÓN

La señal de salida de los sensores de presión es de tipo diferencial dado que en su estructura se presentan dos elementos piezorresistivos de medición (P1 y P2), uno estático que sirve como referencia y el otro que se ve afectado por la presión ejercida en los puntos de medición. Como el sensor genera dos señales de salida se requiere la diferencia de las mismas. En la siguiente grafica (figura 27), se indica la conexión existente entre el sensor y el amplificador.

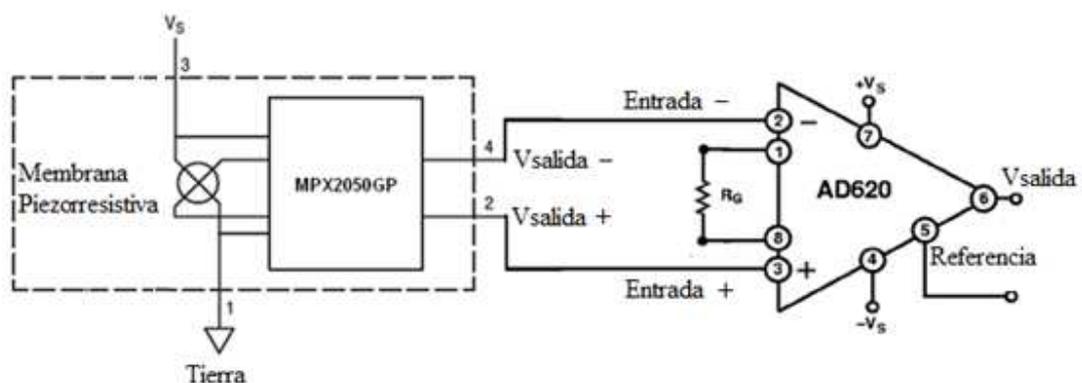


Figura 27. Conexiones entre el amplificador y el sensor de presión.

Las ampliaciones necesarias para los sensores de presión son las siguientes:

Caudal

Resistencia utilizada  $470 \Omega$

Ganancia obtenida 106,106383

Presión en el canal

Resistencia utilizada  $100 \Omega$

Ganancia obtenida 495

#### 4.2. ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA SENSORES ÓPTICOS

Los sensores ópticos utilizados poseen una única salida de voltaje, de esta forma la entrada negativa del amplificador es referenciada a tierra.

En la gráfica (figura 28) se aprecian las conexiones entre el amplificador y el sensor.

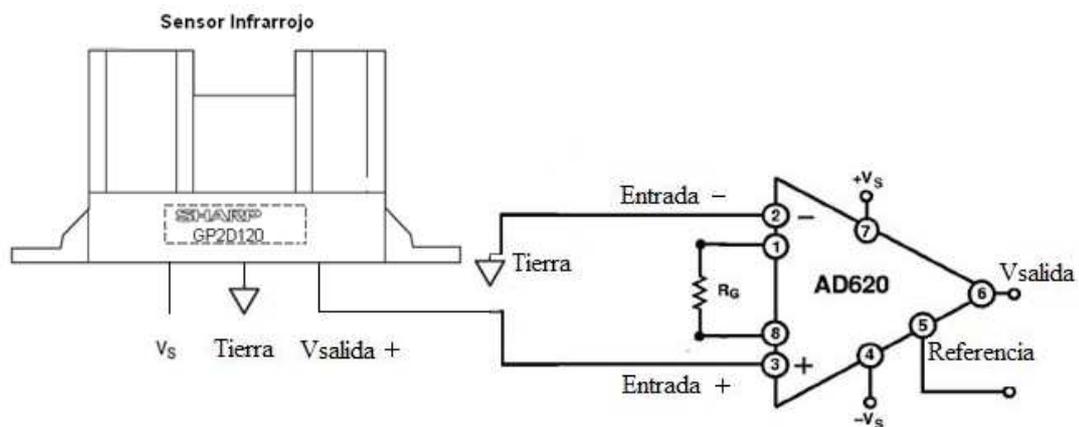


Figura 28. Conexiones entre el amplificador y el sensor óptico.

Las resistencias usadas y las ampliaciones obtenidas para las mediciones de inclinación y de nivel son las siguientes:

Inclinación

Resistencia utilizada  $28200 \Omega$

Ganancia obtenida 2,75177305

Nivel

Resistencia utilizada  $60000 \Omega$

Ganancia obtenida 1,82333333

## 5. DISEÑO DEL HARDWARE DE FUNCIONAMIENTO

### 5.1. CONVERSIÓN ANALÓGICA DIGITAL DE LAS SEÑALES DE LOS SENSORES

Las salidas analógicas de los acondicionadores de los diferentes sensores utilizados son digitalizadas y acopladas a través del conversor análogo digital ADC0808. Este conversor de resolución 8 bits es suficiente para las medidas tomadas por cada sensor, además dispone de 8 canales analógicos suficientes para el acople de cada variable.

El Control de la dirección del canal análogo a medirse se hace a través del software, es decir, el programa realizado para la adquisición de datos selecciona que variable necesita ser medida y digitalizada.

La disposición de los sensores en los canales es la siguiente:

Canal 1: Sensor de Presión (Canal posición intermedia)

Canal 2: Sensor de Presión (Canal posición extrema)

Canal 3: Sensor de Presión 1 (Caudal)

Canal 4: Sensor de Presión 2 (Caudal)

Canal 5: Sensor Óptico Infrarrojo (Inclinación)

Canal 6: Sensor Óptico Infrarrojo (Nivel en el Canal)

### 5.2. MICROCONTROLADOR

El microcontrolador utilizado en el proyecto es el AT89C51 de atmel, está basado en los microprocesadores de 8 bits; contiene internamente un CPU de 8 bits, 3 puertos de entrada y salida paralelos, un puerto de control, el cual a su vez contiene; un puerto serie, dos entradas para Timer/Contador de 16 bits, dos entradas para interrupciones externas, las señales de RD y WR para la toma o almacenamiento de datos externos en RAM, la señal de PSEN para la lectura de instrucciones almacenadas en EPROM externa. Gracias a estas tres señales el microcontrolador 8051 puede direccionar 64 K de programa y 64K de datos separadamente, es decir un total de 128Kb. Además cuenta con 128 bytes de memoria RAM interna. El microcontrolador AT89C51 puede generar la frecuencia (Baud Rate) de Transmisión/Recepción de datos por el puerto serie de manera automática partiendo de la frecuencia del oscilador general, por medio de la programación del Timer 1. Dicha frecuencia de transmisión puede ser cambiada en cualquier momento con solo cambiar el valor almacenado en el control o también se puede duplicar o dividir la frecuencia con solo escribir sobre el bit 7 (SMOD) del registro de control (PCON).

Este microcontrolador es el encargado de controlar los procesos y establecer la comunicación bidireccional entre el software de control y adquisición de datos y el hardware dispuesto para cada sensor.

El microcontrolador recibe la orden del software de adquisición de datos para que se establezca que canal análogo del ADC0808 en los cuales están dispuestos los sensores, es el escogido para ser digitalizado. La señal digitalizada del sensor es capturada por el puerto P1 del microcontrolador y es transmitida al software de adquisición de datos que calibra, filtra y registra la medición. Esto sucede para cada sensor de acuerdo a la secuencialidad dada en el software.

### 5.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación es una fuente de computador capaz de energizar los circuitos y sensores diseñados para la instrumentación.

El uso de una fuente conmutada como esta, se debe a los problemas de puesta a tierra existentes en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño. Esta fuente es capaz de estabilizar en parte el comportamiento de la energía para este lugar.

El microcontrolador y los sensores ópticos necesitan una fuente de alimentación de 5 voltios. Los sensores de presión requieren ser alimentados con 12 voltios. Los amplificadores de instrumentación AD620 dispuestos para los sensores de presión necesitan doble alimentación de 12 voltios y -12 voltios.

### 5.4. CONVERTOR SERIAL A USB

Para que se realice la adquisición de datos a través de un puerto USB y no por el puerto serial el cual ya no está en uso en las tecnologías recientes, se ha utilizado el cable convertor usb232 (figura 29) que acopla la comunicación serial diseñada con un puerto USB en uso. En la siguiente figura se muestra el cable Usb232



Figura 29. Cable Usb232

## 5.5. CIRCUITOS ELABORADOS

5.5.1. Tarjeta de control. La tarjeta de control está compuesta principalmente por el microcontrolador AT89C51, y el conversor ADC0808. En el circuito se han dispuesto borneras conectadas a los canales analógicos del ADC0808 para ser conectadas a las salidas de los circuitos acondicionadores de señal diseñados para cada sensor de medida.

Esta placa es la encargada de procesar toda la información recogida por los sensores mediante el microcontrolador AT89c51 el cual adquiere la señal digital entregada por el conversor ADC0808 y la trasmite a través de la interfaz serial RS-232 al computador. El microcontrolador cuenta con un botón de reset junto a un sistema de antirrebote para reinicializar el firmware si fuese necesario.

La conversión análogo digital, se realiza por medio del integrado ADC0808, al cual se encuentran conectadas cada una de las señales acondicionadas de las salidas de los sensores.

Las salidas digitales del conversor encuentran conectadas al puerto 1 del microcontrolador. También se conectan 4 pines del puerto 2 del microcontrolador al control del ADC0808 para seleccionar el canal del conversor que se quiera utilizar, es decir que sensor va a ser digitalizado y transmitido al computador. La señal de reloj que necesita el conversor fue diseñada con un arreglo de compuertas NAND junto a un par de condensadores y resistencias; la señal de reloj es de tipo cuadrada de aproximadamente 500Khz estables

Para la interfaz RS-232 o comunicación serial, se hace uso de un dispositivo de acople de voltajes, MAX232, el cual cambia los niveles TTL a los del estándar RS-232 cuando se hace una transmisión, y convierte los niveles RS-232 a TTL cuando se tiene una recepción. El dispositivo necesita únicamente una serie de capacitores de 1uF entre sus terminales para su correcto funcionamiento.

En esta placa únicamente se trabaja con 5 voltios para la alimentación.

Adicionalmente, se ha habilitado un conector para la señal de interrupción del microcontrolador, esto en vista de que se realizaron pruebas con sistemas de ultrasonido que requerían el uso de esta función, sin embargo, en el desarrollo del proyecto se descartó el uso de estos sistemas; también se dispuso conectores de salida al puerto 0 del microcontrolador, para si se necesita se puede realizar conexiones a display o alguna otra función en un trabajo posterior.

A continuación se muestra el diagrama del circuito de la tarjeta de control (figura 30)l.



5.5.2. Módulos amplificación para sensores. Se usa amplificadores operacionales debido a que las señales de salida de los sensores son muy pequeñas y además se requiere aprovechar la máxima resolución del ADC0808 según el voltaje de referencia para la conversión analógica-digital.

Se utilizó el amplificador de instrumentación AD620, el cual para los sensores infrarrojos se conecta a su entrada positiva la salida del sensor y su entrada negativa se aterriza, para trabajar de este modo como un amplificador no inversor. Las ganancias de cada uno fueron calculadas teniendo en cuenta las condiciones de cada uno de los sensores y los requerimientos que se necesitaban.

En el siguiente diagrama (figura 31) se muestra el diagrama para este circuito.

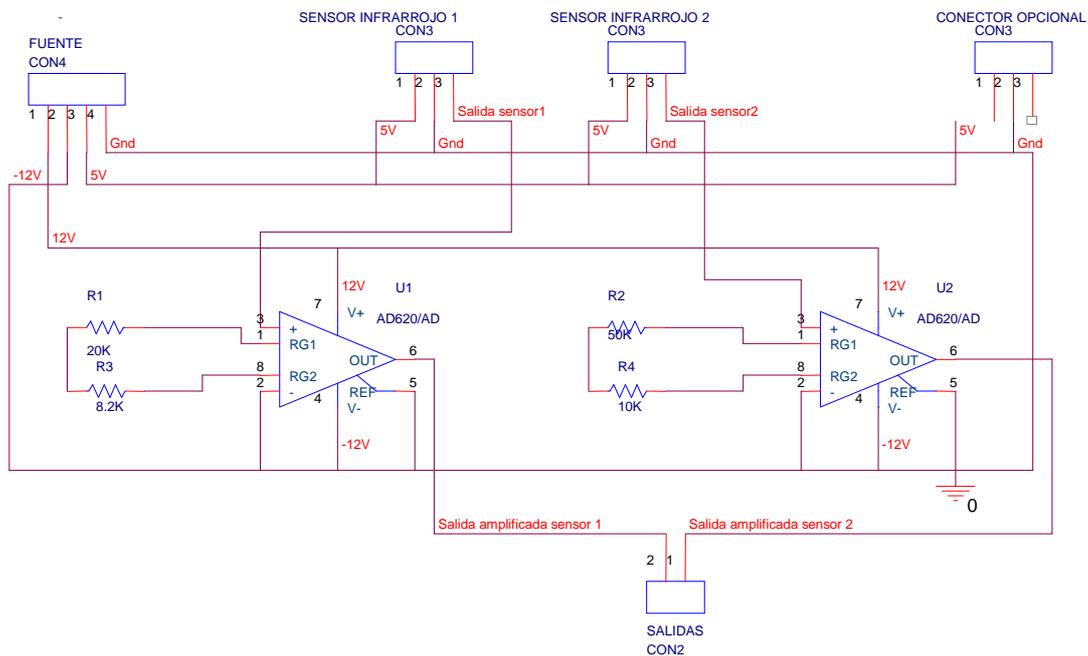


Figura 31 .Diagrama amplificadores sensores infrarrojos

El circuito de acondicionamiento para los sensores de presión, diferencia las salidas de los sensores de presión y amplifica cada señal de acuerdo a las razones explicadas en la etapa de acondicionamiento.

A continuación (figura 32) se indica el diagrama del circuito para acondicionamiento de los sensores de presión.

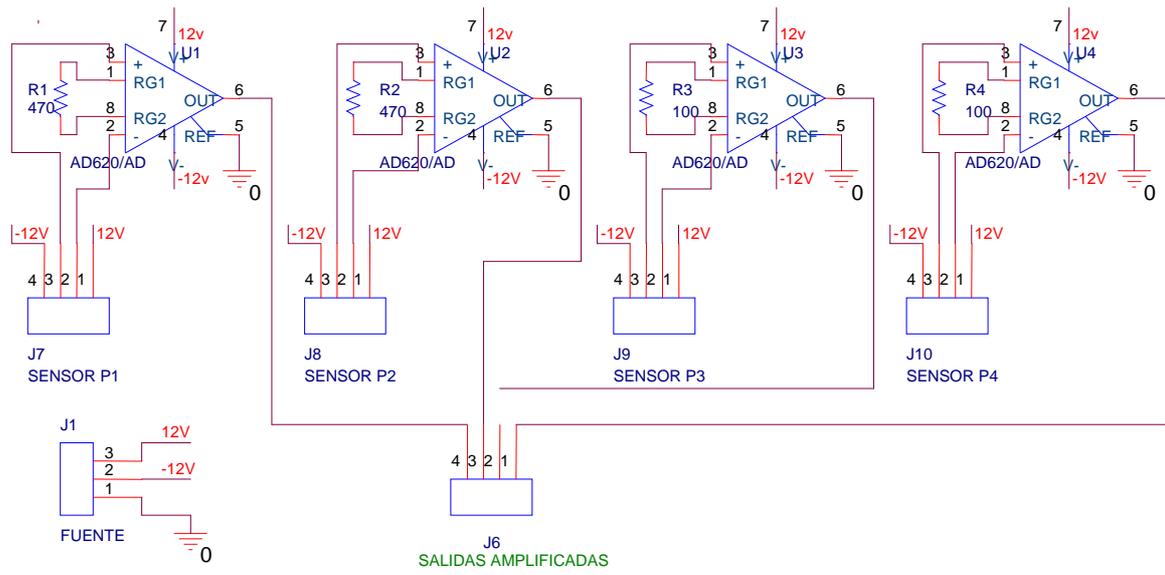


Figura 32. Circuito amplificadores sensores de presión

## 6. CALIBRACIÓN

### 6.1. PRESIÓN Y CAUDAL

El proceso de calibración de los sensores de presión fue realizado utilizando el equipo del laboratorio de hidráulica, calibrador de pesos muertos (figura 33), el cual consiste en un embolo el cual impulsa un liquido (agua) por medio de una tubería conectada en un extremo a un manómetro de rango 0 a 15 psi y por el otro un tubo libre para conectar cualquier medidor que se quiera calibrar; en nuestro caso el sensor de presión MPX2050GP, de tal forma que la presión inducida en el manómetro es la misma aplicada en el sensor.



Figura 33. Calibrador de Pesos muertos

Dado que el voltaje de salida del sensor es bajo, se utiliza una etapa de amplificación con la cual se consigue que el voltaje varíe ya no entre cero y cuarenta milivoltios (0 – 40 mV) sino entre cero y 5 voltios (0 - 5V).

En el siguiente paso se tomaron 10 datos cada 0.5 psi, en los cuales se tenía en cuenta tanto el voltaje de salida que obteníamos del sensor, como la medición en Labview de los datos generados en la digitalización de la señal del sensor, que como podemos recordar, está diseñada con un voltaje de referencia de 5V en el conversor análogo-digital ADC0808.

A continuación se muestra una tabla 1 con los datos obtenidos:

PRESIONES (psi)	VOLTAJES DEL SENSOR EN MUESTRAS DE PRESIÓN (Voltios)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	0,58	0,50	0,46	0,52	0,51	0,58	0,56	0,46	0,46	0,45
1	0,90	0,77	0,79	0,91	0,83	0,81	0,88	0,80	0,85	0,78
1,5	1,12	1,21	1,20	1,23	1,23	1,20	1,21	1,15	1,17	1,15
2	1,39	1,39	1,52	1,45	1,43	1,43	1,54	1,54	1,49	1,52
2,5	1,75	1,84	1,85	1,86	1,84	1,84	1,87	1,80	1,84	1,84
3	2,11	2,10	2,15	2,18	2,16	2,17	2,18	2,15	2,16	2,16
3,5	2,45	2,45	2,47	2,43	2,45	2,51	2,42	2,49	2,48	2,49
4	2,81	2,81	2,82	2,83	2,84	2,80	2,82	2,74	2,82	2,83
4,5	3,09	3,12	3,16	3,15	3,15	3,11	3,14	3,16	3,15	3,16
5	3,49	3,47	3,46	3,46	3,49	3,45	3,45	3,46	3,49	3,46
5,5	3,82	3,76	3,71	3,81	3,77	3,79	3,80	3,83	3,78	3,80
6	4,12	4,16	4,16	4,14	4,15	4,11	4,15	4,12	4,16	4,16
6,5	4,45	4,45	4,43	4,47	4,46	4,47	4,44	4,49	4,44	4,47
7	4,71	4,79	4,78	4,78	4,78	4,82	4,81	4,80	4,82	4,80
7,25	4,97	4,97	4,98	4,97	4,97	4,97	4,98	4,98	4,97	4,97

Tabla 1. Datos de calibración para los sensores de presión

La siguiente es una representación grafica de los voltajes de salida del sensor a diferentes presiones (figura 34).

## Voltaje de salida del sensor MPX2050GP a diferentes presiones

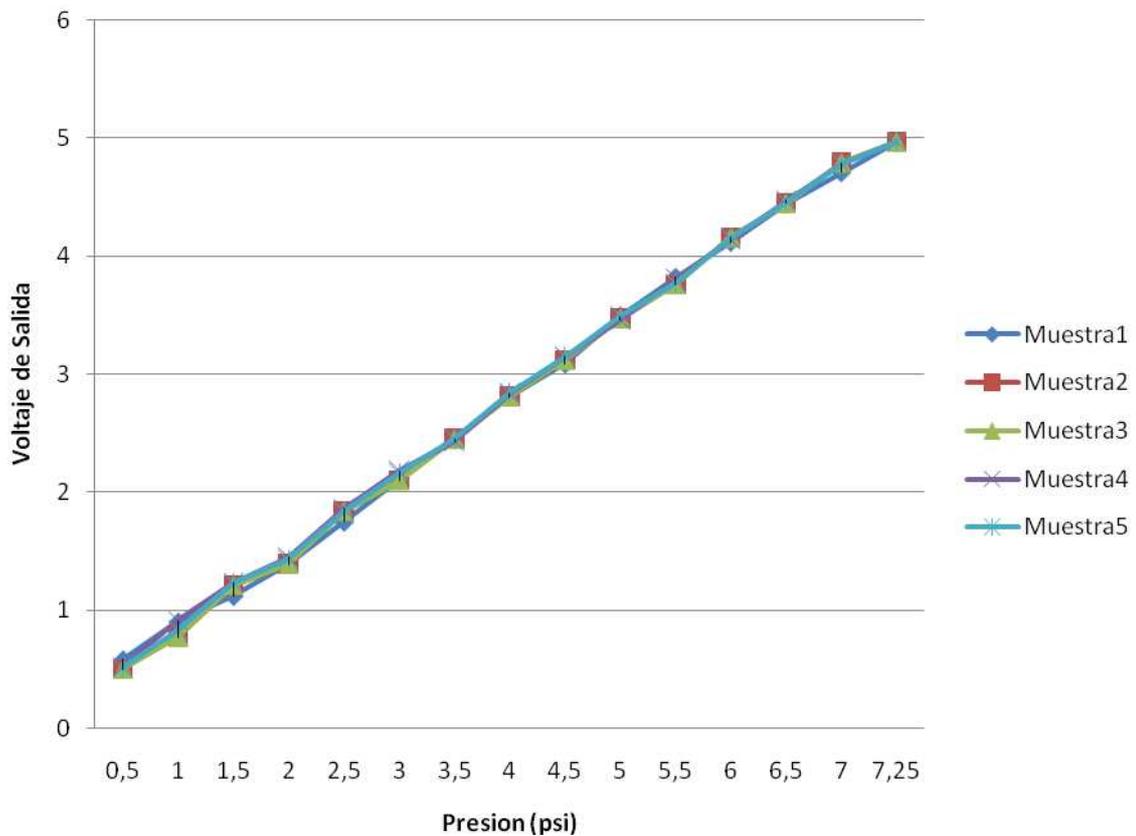


Figura 34. Gráfica voltajes de salida del sensor MPX2050GP a diferentes presiones

La comprobación de los datos se realiza por medio del manómetro, por esta razón se decidió realizar las 10 mediciones para cada uno de los valores de presión, en la anterior gráfica únicamente se muestran las primeras cinco muestras ya que por la cercanía de los datos se entiende el comportamiento de los demás.

Observando este comportamiento se procede a encontrar el promedio de los datos para cada valor de presión medido en la tabla 2, para de este modo ajustar una ecuación que traduzca el voltaje de salida del sensor al valor de presión en psi al cual corresponde.

PRESIÓN (psi)	PROMEDIO VOLTAJE DE SALIDA (Voltios)
0	0
0,5	0,508
1	0,832
1,5	1,187
2	1,47
2,5	1,833
3	2,152
3,5	2,464
4	2,812
4,5	3,139
5	3,468
5,5	3,787
6	4,143
6,5	4,457
7	4,789
7,25	4,973

Tabla 2. Promedio de voltaje de salida del sensor a diferentes presiones

A continuación (figura 35) se muestra una gráfica del promedio la pruebas realizadas.

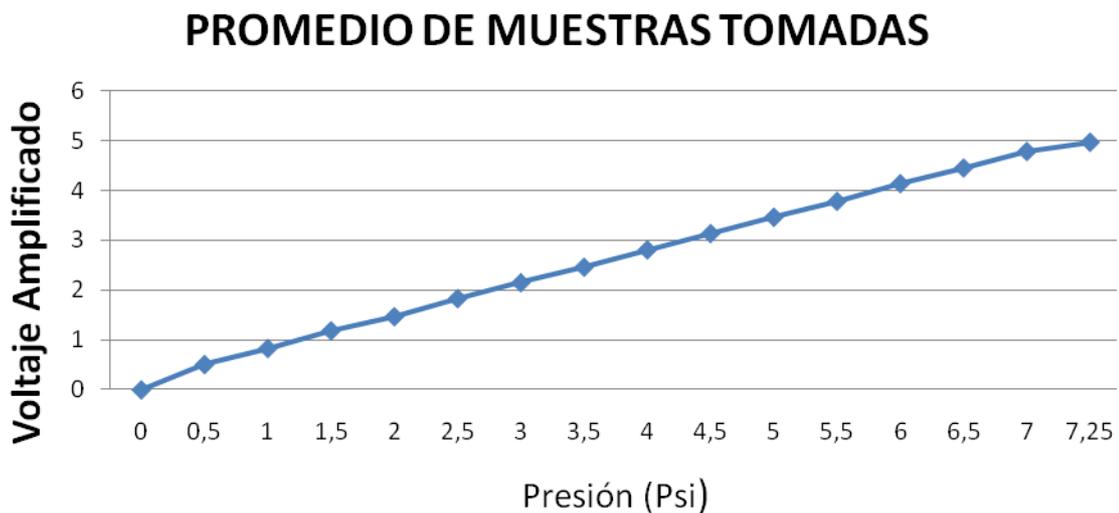


Figura 35. Gráfica promedio voltaje de salida del sensor MPX2050GP a diferentes presiones

Este resultado nos permite resaltar la linealidad que ofrece el sensor en su salida referente a las diferentes presiones aplicadas, además también observamos el funcionamiento correcto por parte de la etapa de amplificación en la cual no se muestran desviaciones significativas respecto a una línea ideal, lo cual es importante para la siguiente fase del proceso de calibración.

Ya que la presión que se maneja en los sensores de medición de caudal abarca casi el total del rango de operación de estos, se utiliza una amplificación de su voltaje de 106 veces, con lo cual en el valor máximo de presión 7,25psi, el voltaje final de salida será 4,25 voltios; la cual nos permite visualizar de manera correcta estas mediciones, teniendo en cuenta que el voltaje de referencia en el conversor análogo-digital es de 5 voltios.

$$y = 0,033410138x$$

En los sensores ubicados a lo largo del canal, la presión que se trabaja es baja, esta no supera los 2 psi, por lo cual se trabaja con una amplificación mayor, de 495 veces el valor original, para de este modo obtener una mejor visualización del proceso en sí. En esta etapa de la adquisición de datos se cuenta con un sistema de medición anterior, los piezómetros, el cual actúa de manera simultánea con el sistema de medida electrónico diseñado, esto nos mostró una ligera desviación entre los datos que nuestro sistema mostraba con los que se observaban en los piezómetros, lo cual condujo a realizar una ligera adecuación en la curva de calibración que se estaba trabajando en este par de sensores.

Se determinó que la mejor manera de hacer corresponder las medidas de los sistemas, era tomar como referencia las mediciones de los piezómetros y adecuar una curva de funcionamiento en los sensores de presión que representará ese comportamiento con lo cual se tomaron muestras de datos a diferentes presiones en la tabla 3 tanto en los piezómetros como de los sensores en el sistema de adquisición utilizando Labview y de este modo obtener la ecuación de dicho comportamiento.

Prueba	Sensor 3			Sensor 4		
	Piezómetro (cm de columna de agua)	Piezómetro (psi)	Digitalización	Piezómetro (cm de columna de agua)	Piezómetro (psi)	Digitalización
1	7,2	0,102403641	20	4,7	0,066846821	19
2	11,8	0,167828189	36	7	0,099559095	22
3	32	0,455127293	74	17,5	0,248897738	42
4	31,7	0,450860475	74	17,6	0,250320011	43

Tabla 3. Pruebas de presión en sensores del canal

Con los datos anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones de calibración mediante regresión lineal:

Sensor 3

$$y = mx + b$$

$$m = 0,007378321872$$

$$b = -0,094603232$$

$$y = 0,007378321872 - 0,094603232 \quad (1)$$

Sensor 4

$$y = mx + b$$

$$m = 0,007367782436$$

$$b = -0,066523003$$

$$y = 0,007367782436x - 0,066523003 \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) ecuaciones representan de manera muy adecuada el comportamiento de cada uno de los sensores respecto a lo que se muestra en los piezómetros, de esta forma se garantiza que las medidas realizadas electrónicamente están acorde a lo mostrado en otros sistemas de medida.

## 6.2. NIVEL

En el sistema de medición de nivel del agua como ya se mencionó anteriormente se hace uso del sensor de proximidad infrarrojo GP2D120, este sensor brinda una salida en voltaje proporcional a la proximidad o distancia a la cual se encuentra el obstáculo el cual se quiere medir. El sistema que se dispuso para esta medición permite ubicar el sensor en forma paralela al canal, además permite variar la distancia a la cual se quiere ubicar el sensor respecto del canal, esto con el fin de poder obtener la mejor respuesta variando las distancias de posicionamiento. El primer paso para la calibración fue determinar la posición del sensor respecto al canal y medir el voltaje de salida del sensor con canal vacío y con canal lleno, para poder operar en el rango más lineal de la curva de salida de este, así facilitara la posterior manipulación de los datos, las pruebas conllevaron a que la distancia entre el canal y el sensor es de 1,5cm.

El siguiente paso es encontrar la ecuación que represente el comportamiento del voltaje de salida del sensor a los cambios de nivel en el canal. Dado que el diámetro del canal es relativamente pequeño 33,4 mm, solo se toman como datos representativos los niveles lleno y vacío. El sensor está adecuado para trabajar con una respuesta lineal, por esta razón solo se toman los valores extremos de calibración. A continuación (figura 36) se muestran las curvas de calibración.

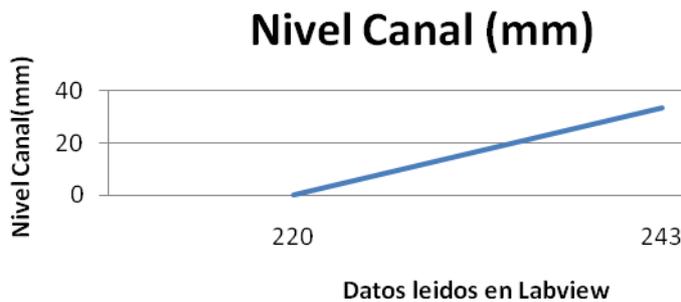
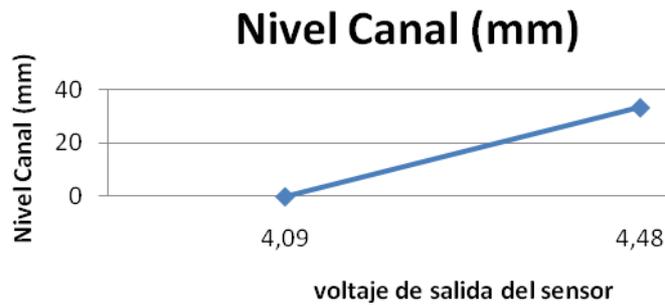


Figura 36. Curvas de comportamiento de la salida del sensor óptico en voltaje y digitalizado

Con estos datos fácilmente podemos definir una ecuación para obtener una medida de nivel en centímetros, para iniciar se puede hacer corresponder los orígenes de las coordenadas con una simple resta tanto en la curva de nivel versus voltaje como en la de nivel versus datos leídos, ahora lo que se tiene es una recta sencilla para la cual es muy fácil calcular su ecuación

$$y = Ax + b$$

Donde b es cero ya que los orígenes coinciden el cálculo de la pendiente se realiza de la siguiente forma:

$$A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$A = \frac{33,4 - 0}{243 - 220}$$

$$A = \frac{33,4}{23}$$

$$A = 1,4521173913$$

$$y = 1,4521173913x \quad (3)$$

La ecuación (3) permite convertir los datos leídos en el programa de adquisición en la medida en milímetros del nivel que se encuentra en el caudal, posteriormente se realiza

una comprobación visual de los datos utilizando una regla y se procede a determinar la efectividad del sistema.

### 6.3. INCLINACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, la medición de inclinación en el soporte del canal se mide por medio del uso de un sensor de proximidad infrarrojo, el cual su voltaje de salida es proporcional a la distancia a la cual encuentra un obstáculo, utilizando este principio se diseñó un sistema en el que el sensor es solidario al canal y el obstáculo es una viga vertical de este modo se logra obtener una diferencia en la distancia entre el sensor y el obstáculo dependiendo del ángulo al cual se encuentre ubicado el canal (figura 37).

El proceso de calibración comenzó definiendo las posiciones en las vigas de soporte para las medidas de cada ángulo, con lo cual se determinó que en su posición más baja, el canal se encuentra a una inclinación de  $-4.81^\circ$  y en la posición más alta el ángulo de inclinación es de  $10^\circ$ .

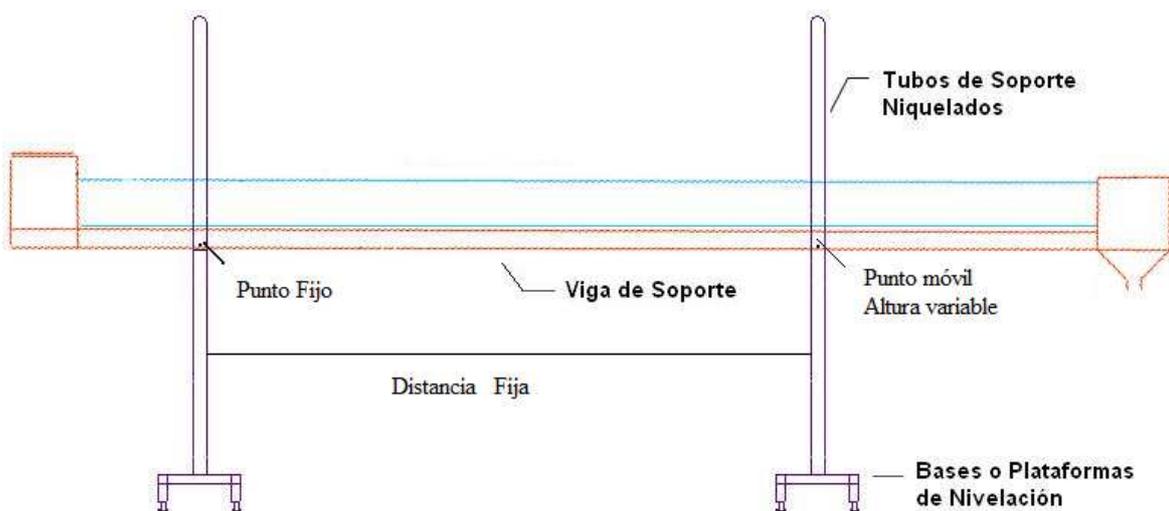


Figura 37. Diagrama de puntos de movimiento en la estructura general

Estas medidas se realizaron utilizando una sencilla fórmula trigonométrica, conociendo la longitud entre el punto fijo del canal y la parte móvil de este sobre la cual se encuentra anclada la polea para generar el movimiento, y determinando el ángulo que se quiere medir se define la altura a la cual fijar el soporte (figura 38), una vez se coloque el soporte a la distancia correcta para cada valor de ángulo se procede a realizar una toma de datos que se obtienen en Labview y de este modo agrupar para cada uno de los valores de ángulos las variaciones en los datos leídos, los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.



Figura 38. Calibraciones de distancia correspondientes a la posición de los ángulos en tubo de soporte

Angulo (°)	Altura	Datos Leídos	Rango de Datos leídos
-4	21,1878	246 – 248	247 – 256
-3	15,879	242 – 244	247 – 241
-2	10,58	233 – 236	241 – 235
-1	5,288	223 – 227	235 – 227
0	0	216 – 219	219 – 227
1	5,288	205 – 207	209 – 219
2	10,58	192 – 195	209 – 198
3	15,879	179 – 181	184 – 198
4	21,1878	163 – 166	172 – 184
5	26,509	156 – 158	160 – 172
6	31,84	151 – 154	154 – 160
7	37,2	144 – 147	147 – 154
8	42,583	132 – 134	135 – 147
9	47,99	123 -125	126 – 135
10	53,427	112 - 115	116 – 126

Tabla 4. Rangos de valores digitalizados para definir calibración de inclinación

Esta calibración se realizó de este método ya que en la digitalización del voltaje del sensor se presentaban cambios muy grandes en las medidas debido a que el sistema de polea que se usa para cambiar de posición el soporte del canal genera vibraciones y movimientos abruptos, por lo tanto la utilización de una ecuación que representara el comportamiento de este no funcionaba por esta razón.

## 7. SOFTWARE

El programa de control y adquisición de datos fue diseñado en el software LABVIEW 7.0

### 7.1. LABVIEW

Labview de *National Instrument*, es una herramienta de programación gráfica, altamente productiva, para la construcción de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Labview nos da la capacidad de crear rápidamente una interfaz de usuario que nos proporciona la interactividad con el sistema.

La programación G es el corazón de Labview, y difiere de otros lenguajes de programación como C o Basic, en que éstos están basados en texto, mientras que G es una programación gráfica.

Los programas en G, o VIs (“*Virtual Instruments*”) constan de una interfaz interactiva de usuario y un diagrama de flujo de datos que hace las funciones de código fuente.

De forma más específica, la programación gráfica Labview se estructura como sigue:

- La interfaz interactiva de usuario de un VI se llama Panel Frontal, debido a que simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores. Los datos se introducen utilizando el ratón y el teclado, y los resultados se muestran en la pantalla del ordenador.
- El VI recibe instrucciones de un diagrama de bloques que construimos en G. El diagrama de bloques es la solución gráfica a un determinado problema de programación. Además, el diagrama de bloques es el código fuente de nuestro programa o VI.
- Los VIs son jerárquicos y modulares. Pueden utilizarse como programas de alto nivel o como subprogramas de otros programas o subprogramas. Cuando un VI se usa dentro de otro VI, se denominan subVI. El icono y los conectores de un VI funcionan como una lista de parámetros gráficos de forma que otros VIs puedan pasar datos a un determinado subVI.

### 7.2. DISEÑO DEL PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El programa diseñado en Labview es el encargado de establecer y realizar la comunicación serial entre el microcontrolador y el sistema de adquisición de datos. Mediante este programa se hace la selección de que variable medir.

Este programa es el encargado de controlar y seleccionar las variables a medir, establecer los tiempos de medición, calibrar las curvas de tendencia de las variables, establecer las unidades de medida, depurar datos erróneos, visualizar y almacenar la información obtenida.

7.2.1. Comunicación serial. La comunicación serial requiere establecer algunos parámetros para ser inicializada. Esto se hace en el subprograma configuración VISA del puerto serial (VISA configure serial port).

En este subprograma se especifica el puerto COM, y la velocidad de transmisión. Este subprograma señala si existe un error en la transmisión como cuando el tiempo para que se establezca la comunicación expira, o si las tramas no están completas.

La comunicación serial es la base de la adquisición de datos diseñada para este proyecto. Esta comunicación se basa en configurar e inicializar un enlace entre el software y los instrumentos diseñados mediante una sesión VISA (Virtual Instrument Software Architecture). En una sesión VISA se configuran los parámetros a tenerse en cuenta para un tipo de comunicación.

De esta manera utilizando el subprograma de configuración VISA para puerto serial que muestra la figura 39, se inicia la sesión. Básicamente, la sesión comienza especificando el puerto COM que conecta al ordenador con los instrumentos, y determinando la velocidad de transmisión de datos que para este caso es 9600 bps (bits por segundo). La sesión fue diseñada en una serie de pasos que establecen la sincronización entre el software y los instrumentos.

La sincronía está dada por la secuencialidad establecida en el software. Una vez iniciada la sesión, se envía un carácter hacia el microcontrolador mediante el bloque de escritura mostrado en la figura 40. Estos caracteres están predefinidos y ordenan a la tarjeta de control la digitalización de una de las señales de los sensores y la transmisión de la misma hacia el ordenador. En el software mediante el bloque de lectura (figura 41) se recibe la señal digitalizada mencionada. Cuando se termina la recepción de datos, se cierra la sesión VISA mediante el bloque VISA close (figura 42).



Figura 39. Subprograma Inicia sesión VISA



Figura 40. Bloque de Escritura



Figura 41. Bloque de Lectura



Figura 42. Bloque cierre sesión VISA

7.2.2. Diseño de subprogramas. Como se ha descrito en el concepto del software Labview, con esta herramienta se pueden crear subprogramas que pueden ser llamados por el programa general. El programa de adquisición de datos, es robusto al tener que solicitar, leer, filtrar, y calibrar las medidas para cada variable considerada en el proyecto. Debido a esto, se realizaron seis subprogramas para las variables a medir. Cada subprograma establece la comunicación serial, filtra los datos errados, y calibra

los números obtenidos a las medidas para cada variable. Estos subprogramas se acoplan al programa general mediante entradas y salidas dispuestas en su diseño.

Todos los subprogramas constan en un principio de la inicialización de la comunicación serial, la sincronización del sistema y la recepción de la señal. La tarjeta de control cuenta con un microcontrolador y un conversor análogo digital de 8 bits, por tanto las medidas están en el rango de 0 a 255. El número medido por determinado sensor, digitalizado y transmitido por la tarjeta de control, para ser transferido al ordenador mediante comunicación serial debe ser enviado digito por digito. De este modo cada número para ser transmitido se convierte en un carácter, es decir, una representación en código ASCII de 8 bits. En el subprograma se reciben los 3 caracteres y mediante el bloque de conversión de carácter a un número que muestra la figura 43 se obtiene de nuevo el número para ser calibrado.



Figura 43. Bloque conversor de caracteres a números.

7.2.2.1. Subprograma para medir presión. En la figura 44 se muestra el subprograma que mide la presión 1 en un tubo de alimentación del canal. Esta medida es necesaria para medir caudal. A su lado se encuentra como se mira el subprograma en el programa general. El subprograma llamado requiere la conexión del puerto de conexión hacia la tarjeta de control y posee una salida que entrega el número de interés que es la medida sin calibrarse. Las señales de error que se pueden observar, sirven para determinar si hay algún fallo en la transmisión como por ejemplo, que la tarjeta de control no esté energizada. En la gráfica se observa también como en el subprograma se configura la velocidad de transmisión 9600 bps, el carácter enviado hacia el microcontrolador mediante el bloque de escritura, en este caso la letra A que le ordena al microcontrolador seleccionar el canal 1 del ADC0808 para que sea digitalizada la señal acondicionada del sensor de presión 1. Además se mira como mediante el bloque de lectura se ordena la espera de los 3 caracteres esperados y el cierre de la sesión VISA a continuación. Los caracteres convertidos a números en este subprograma son calibrado al multiplicarse al número 0,033410138; este número fue determinado mediante una linealización en la calibración.

Una vez se ha obtenido la medida, es visualizada en el panel frontal a través de un indicador de tipo manométrico (figura 45) que este caso tiene por nombre Presión Diferencial I.

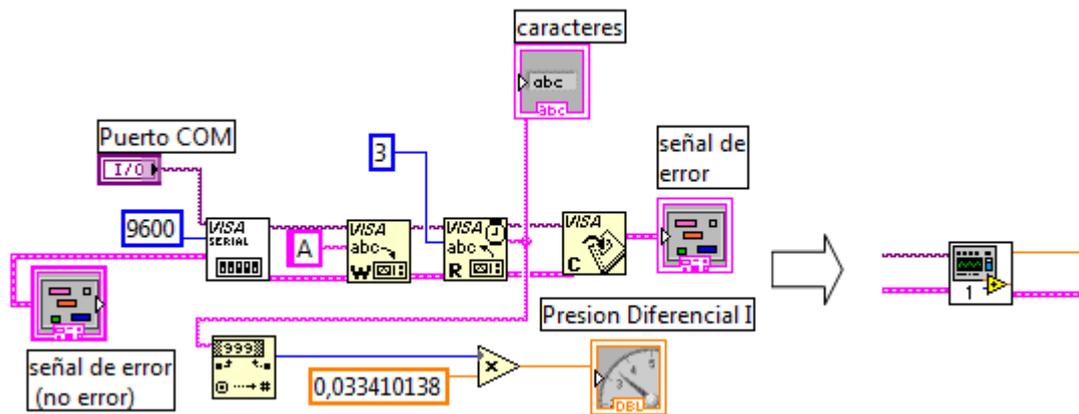


Figura 44. Subprograma y visualización del subprograma en el programa general.



Figura 45. Indicador manométrico en el panel frontal

Los subprogramas para medir las presiones P2, P3, P4, cambian los caracteres enviados al microcontrolador, que respectivamente son B, C, y D para la selección de los canales 2, 3 y 4 del ADC0808.

El subprograma para P2 conserva la misma calibración que el de P1, pero los sensores P3 y P4 requieren que los números adquiridos por los subprogramas sean multiplicados y enseguida restados por unos factores obtenidos en la calibración.

Los subprogramas para P2, P3 y P4 se muestran en las figuras 46, 47 y 48.

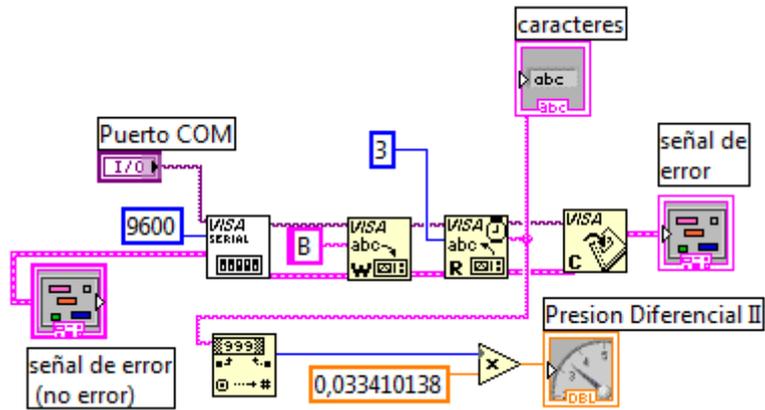


Figura 46. Subprograma para medir presión P2 para caudal

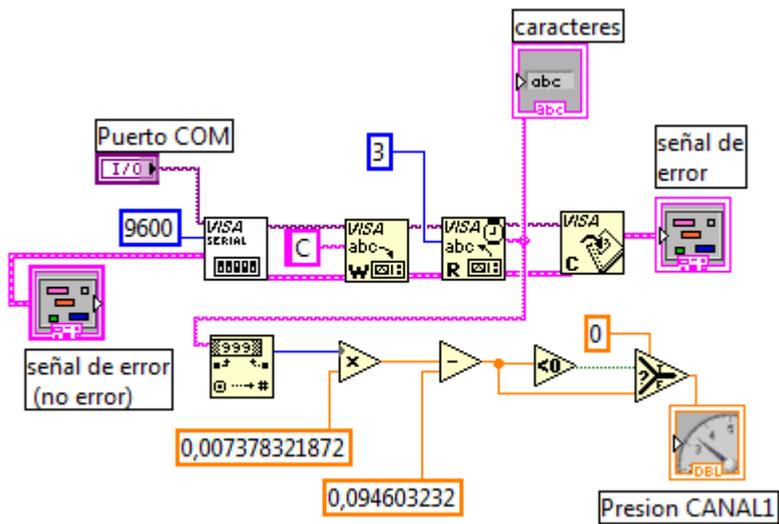


Figura 47. Subprograma para medir presión P3

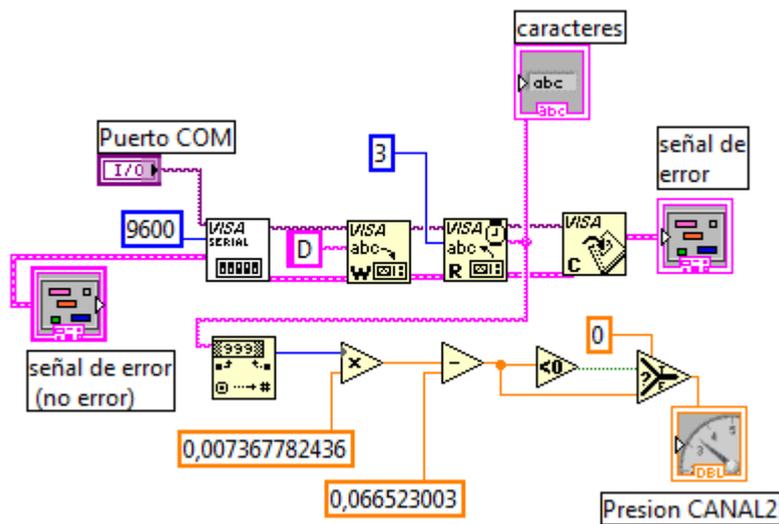


Figura 48. Subprograma para medir presión P4

7.2.2.2. Subprograma para medir inclinación. Este subprograma no es distinto a los demás en cuanto a la comunicación establecida y la conversión de los caracteres adquiridos a número de medida. La letra E es enviada al microcontrolador que direcciona el canal 5 del ADC0808 digitalizando la señal del sensor óptico que mide la distancia entre la viga de soporte y la lamina de reflexión.

Este subprograma se diferencia de los subprogramas de presión en el que en este se incluye un filtrado de medidas. Por el principio físico utilizado para esta variable, cuando se mide distancia por medio de sensores ópticos, los datos obtenidos no son constantes debido al cambio en el ángulo de reflexión cuando existen pequeñas vibraciones o cambios rápidos en lo que se está midiendo.

La inclinación de la viga que soporta el canal es cambiada a través de una polea, este movimiento es muy fuerte, y se debe tener en cuenta que el sensor está sujeto a este mecanismo.

De este modo, se diseñó una filtración de datos que consiste en buscar medidas similares que se repitan para un ciclo de 4 mediciones. El subprograma compara una medida anterior con una siguiente, si la diferencia aritmética entre estas no es mayor a 2 el dato es comparado dos veces más con medidas subsecuentes. Si las comparaciones no exceden estos límites, el dato es considerado como una medida fiable y es calibrado a través de rangos de medición explicados en la sección de calibración que determinan que grado de inclinación tiene la viga de soporte.

Cuando el dato entra a ser examinado por cada rango de medición, el intervalo que lo considere parte de su conjunto determina un número que está entre 1 y 15 que selecciona que argumento de una estructura caso es el escogido. Cada argumento de la estructura caso cuenta con el ángulo de medida estipulado para cada rango, además determina que figura de animación va a ser mostrada en el panel frontal. Las figuras de animación muestran el desplazamiento de la viga de soporte del canal de acuerdo a la inclinación existente.

Este subprograma se encuentra dentro de una estructura while (mientras tanto) que se repita hasta la obtención de una medida confiable.

A continuación se muestran los bloques utilizados y el subprograma de inclinación en las figuras 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 y 59.



Figura 49. Bloque de comparación menor que



Figura 50. Bloque que incrementa contador



Figura 51. Bloque de igualdad aritmética



Figura 52. Bloque de resta aritmética



Figura 53. Bloque que determina el valor Absoluto de un número

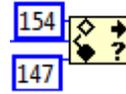


Figura 54. Bloque de rango

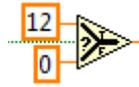


Figura 55. Bloque de decisión dependiente Del bloque de rango



Figura 56. Bloque de suma

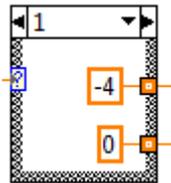


Figura 57. Estructura caso dependiente de una decisión

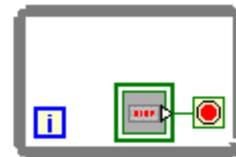


Figura 58. Estructura Del bloque de while.

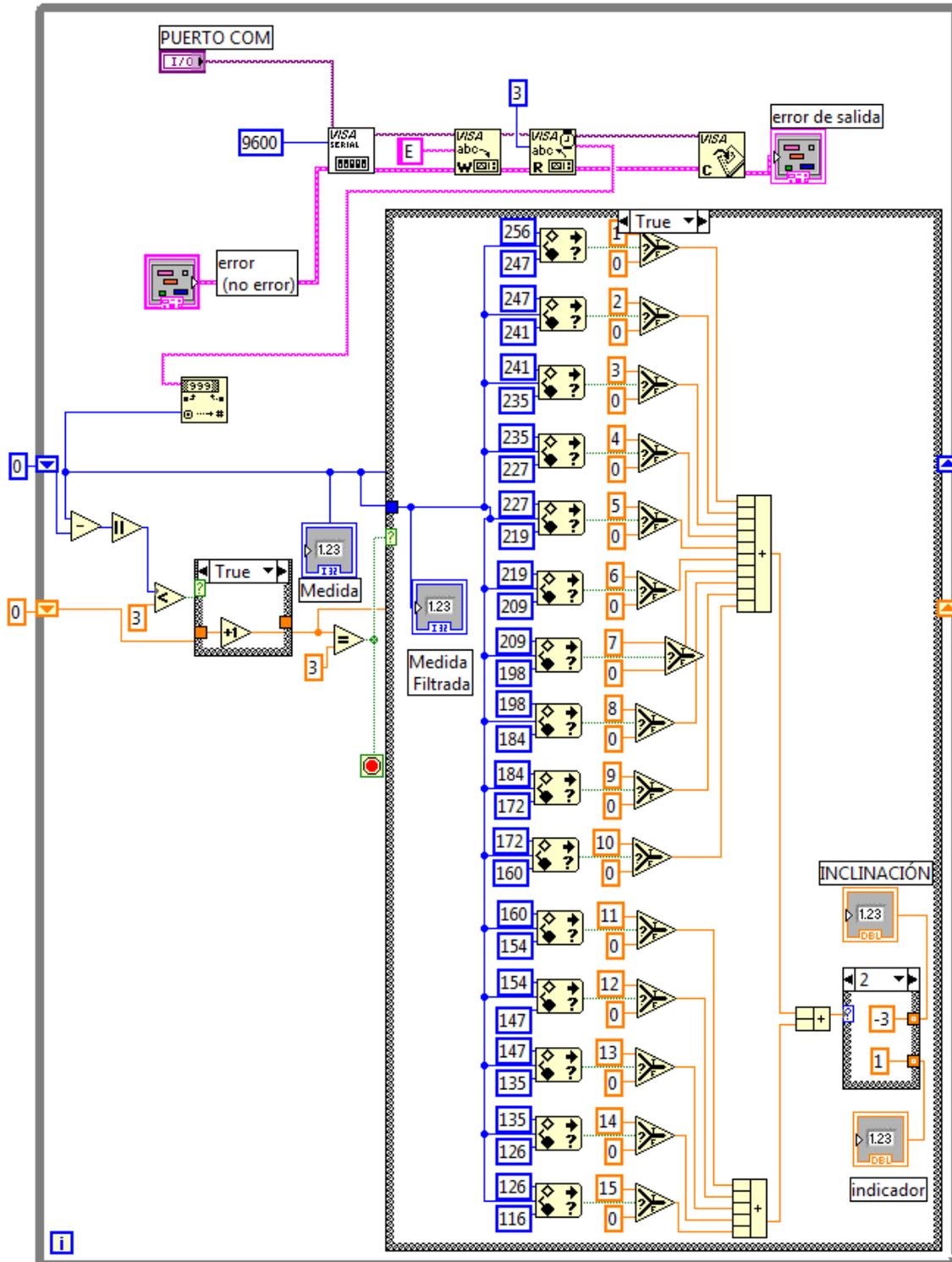


Figura 59. Subprograma de Inclinación.

7.2.2.3. Subprograma para medir nivel. Este subprograma es similar al anterior en cuanto a su filtración de datos. La estructura de filtrado es la misma basado en la similitud de medidas para un número de repeticiones dado.

El dato filtrado, es calibrado mediante una curva explicada en la sección de calibración y mostrado mediante un indicador.

A continuación se muestra el subprograma de inclinación (figura 60).

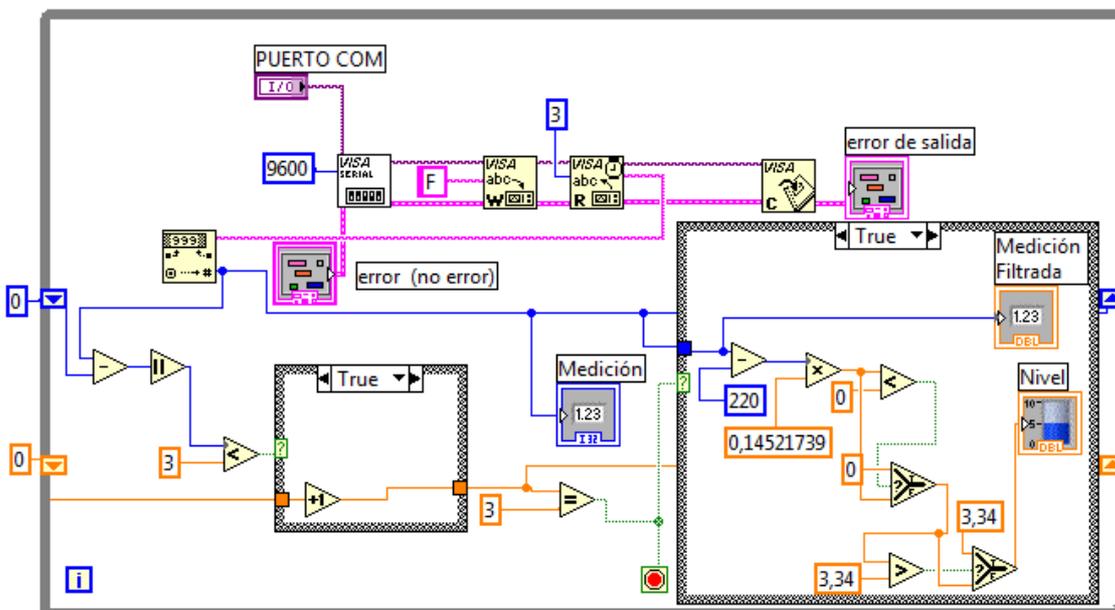


Figura 60. Subprograma de inclinación de datos.

7.2.3. Programa general. Es el encargado de concatenar, llamar y controlar los subprogramas de medición.

En este programa se han diseñado mediante estructuras caso, el control del usuario para escoger la medida de una variable física en la máquina de transporte de mezclas. Todos los subprogramas están listos para ser llamados, simplemente se espera una señal dada por el usuario en el panel frontal para que comience la medición.

En el programa general se ha diseñado el control del tiempo de medición para las medidas de presión y caudal, se ha colocado un tiempo por defecto de 60 segundos para cada medida pero el usuario tiene el control a su acomodo.

Además se ha diseñado un control de unidades de medición para la variable presión. La medida puede ser entrega en psi (libras por pulgada cuadrada), metros de columna de agua, kilopascales y centímetros de mercurio.

Para la medida de caudal se ha explicado que se utiliza la medida de dos presiones cercanas conociendo el estrechamiento existente en la tubería entre estos dos puntos, para medir caudal se aprovecha la ecuación de calibración para orificio instalado

obtenida para la máquina en trabajos anteriores. La ecuación es llamada en el programa general aprovechando que se puede hacer la diferencia entre estas dos presiones medidas. La ecuación para medir caudal es la siguiente:

$$caudal = 0,37 \cdot (\Delta P)^{0,501}$$

Donde  $\Delta P$  es la diferencia de presiones en la unidad centímetros de mercurio. El caudal esta dado en litros por segundo.

Este programa también cuenta con la escritura de datos medidos para cada variable en hojas Excel. Esto fue logrado gracias a la utilización del bloque Write Labview Measurement File (Bloque de escritura de medición en archivo) mostrado en la figura 69.

Cada variable medida cuenta con indicadores apropiados para cada caso en el programa general. De este modo para la medida de caudal se cuenta con un grafico de caudal vs tiempo que muestra las variaciones existentes en la medición. El indicador de nivel indica el llenado del tubo. El indicador de inclinación muestra el desplazamiento de la viga mediante una animación. Los indicadores de presión se muestran mediante manómetros análogos que simulan a los reales.

El programa cuenta con un control de stop para detener la ejecución del mismo. A continuación se muestran los bloques utilizados en el programa general en las figuras 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77 y 78.



Figura 61. Eleva un número entrada A una potencia deseada



Figura 62. Control de tiempo

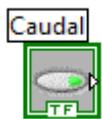


Figura 63. Selector de medición de caudal

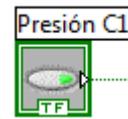


Figura 64. Selector de medición de presión en el canal posición 1

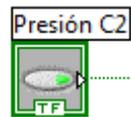


Figura 65. Selector de medición de De presión en el canal posición 1



Figura 66. Selector de medición de Inclinación de la viga de soporte del canal.

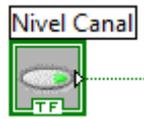


Figura 67. Selector de medición de nivel en el canal

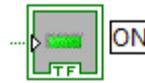


Figura 68. Indicador de encendido

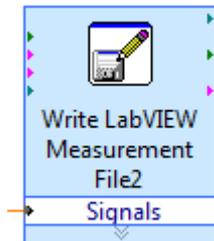


Figura 69. Estructura para almacenar datos en plantillas Excel



Figura 70. Estructura de control de tiempo



Figura 71. Bloque para el diseño de animaciones



Figura 72. Indicador de nivel

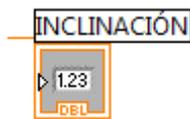


Figura 73. Indicador Inclinación



Figura 74. Indicador Presión canal posición 1



Figura 75. Indicador Presión canal posición 2



Figura 76. Graficador de caudal vs tiempo

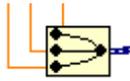


Figura 77. Acople de señal para guardar datos

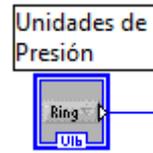


Figura 78. Menú para la selección de unidades de presión

En las figuras 79 y 80, se muestra el programa general de la adquisición, control y visualización desarrollado.

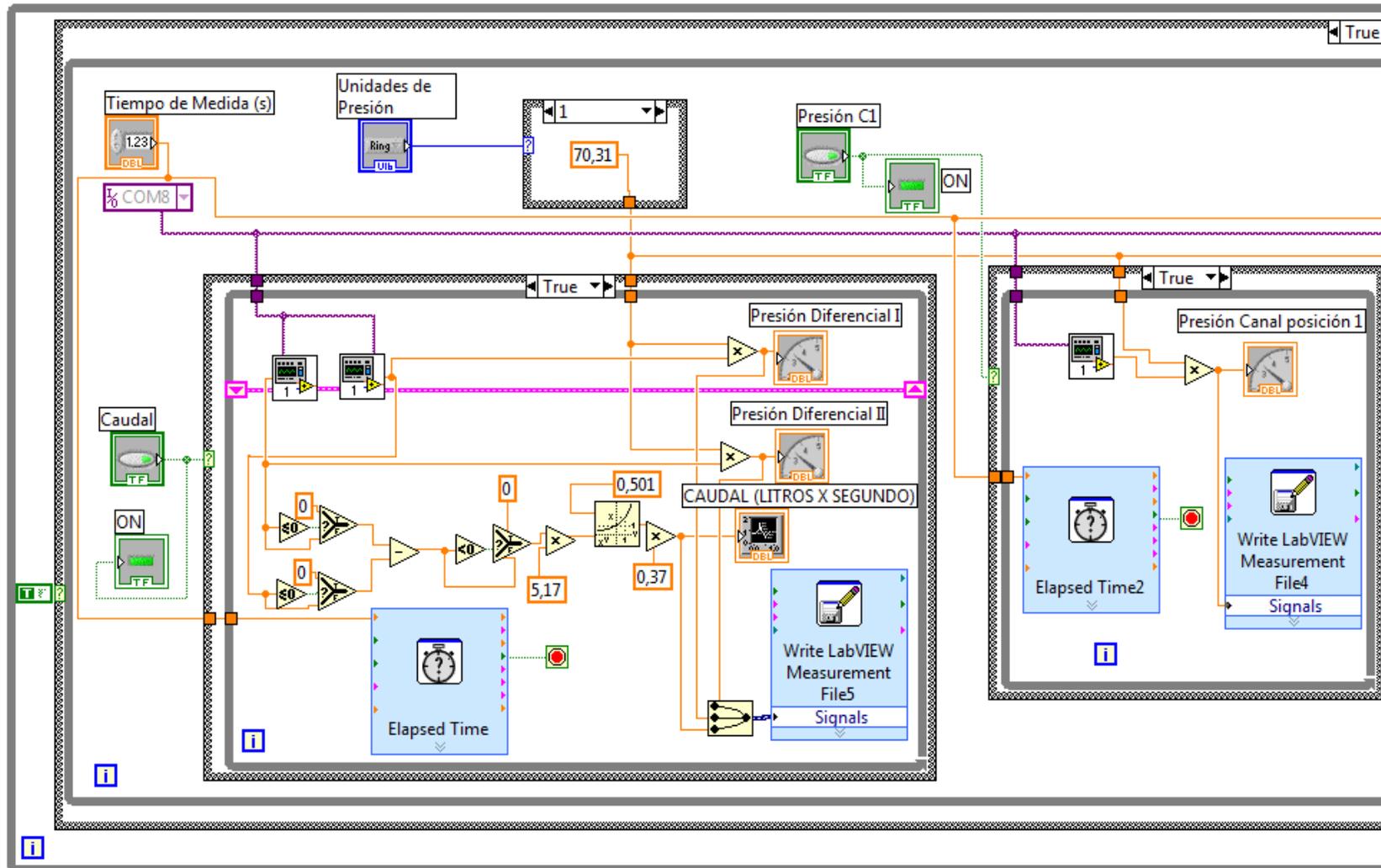


Figura 79. Vista del programa general (Parte I)

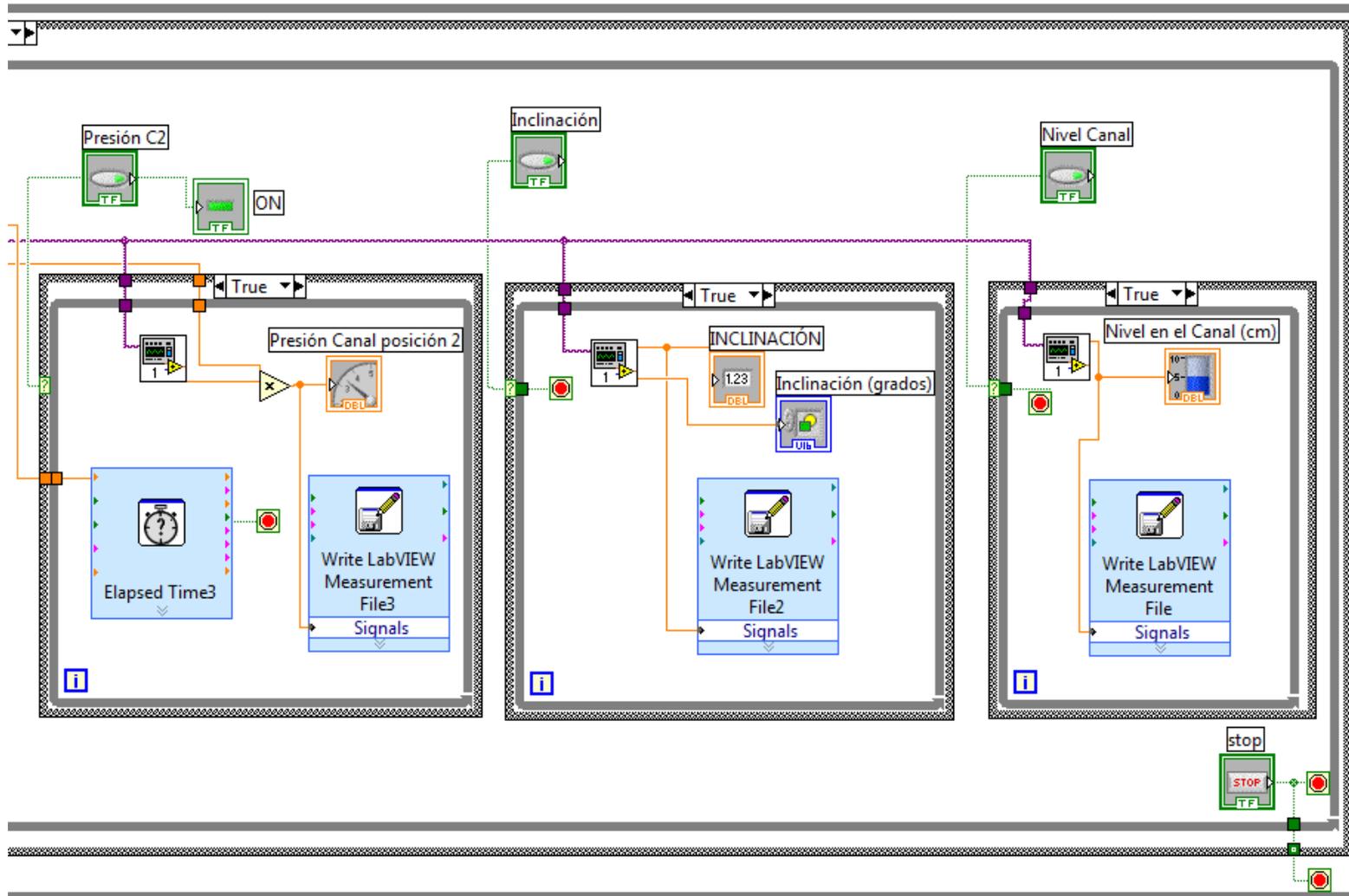


Figura 80. Vista del programa general (Parte II)

7.2.4. Panel frontal. Está compuesto por los selectores de las medidas, el selector de unidades y control de tiempo para presión, un graficador del caudal vs tiempo, y animaciones que muestran el nivel en el canal y la inclinación de la viga de soporte.

En las siguientes figuras 81, 82, 83, 84, 85 y 86 se muestran los componentes del panel frontal y una representación de este.

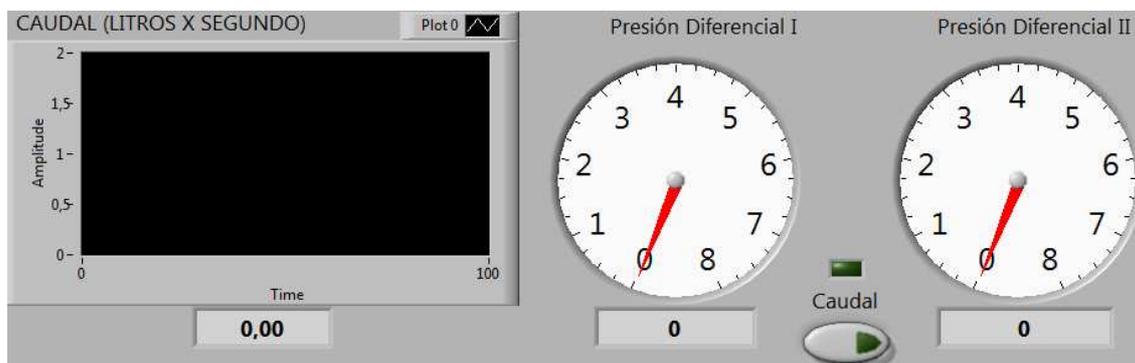


Figura 81. Selector de inicio de medición de caudal e indicadores de medida de caudal y presión



Figura 82. Selector de inicio de medición de nivel e indicador de llenado en el tubo.

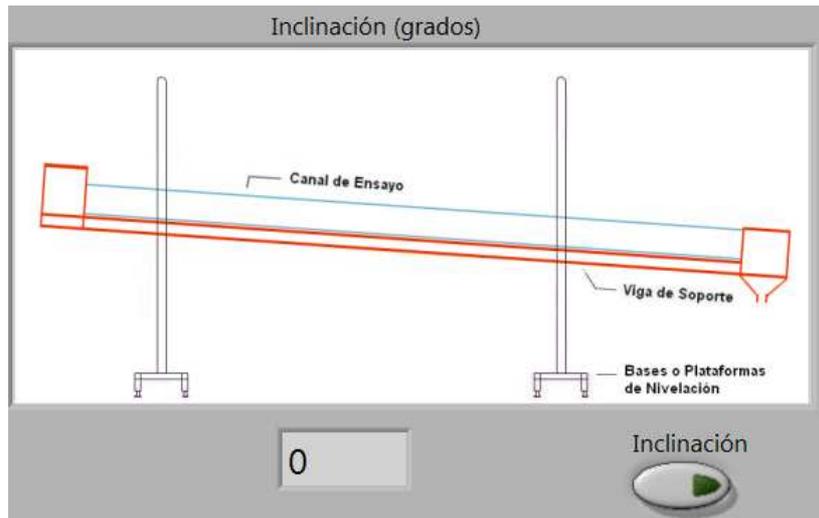


Figura 83. Selector de inicio de medición de inclinación de la viga y animación del proceso



Figura 84. Selectores de medida de presión en las posiciones del canal y visualización de las mismas.

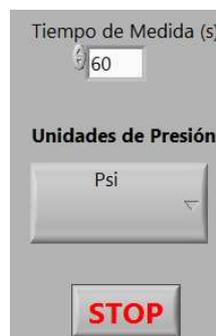


Figura 85. Selector de tiempo y unidades de medida para presión y caudal, detención del programa

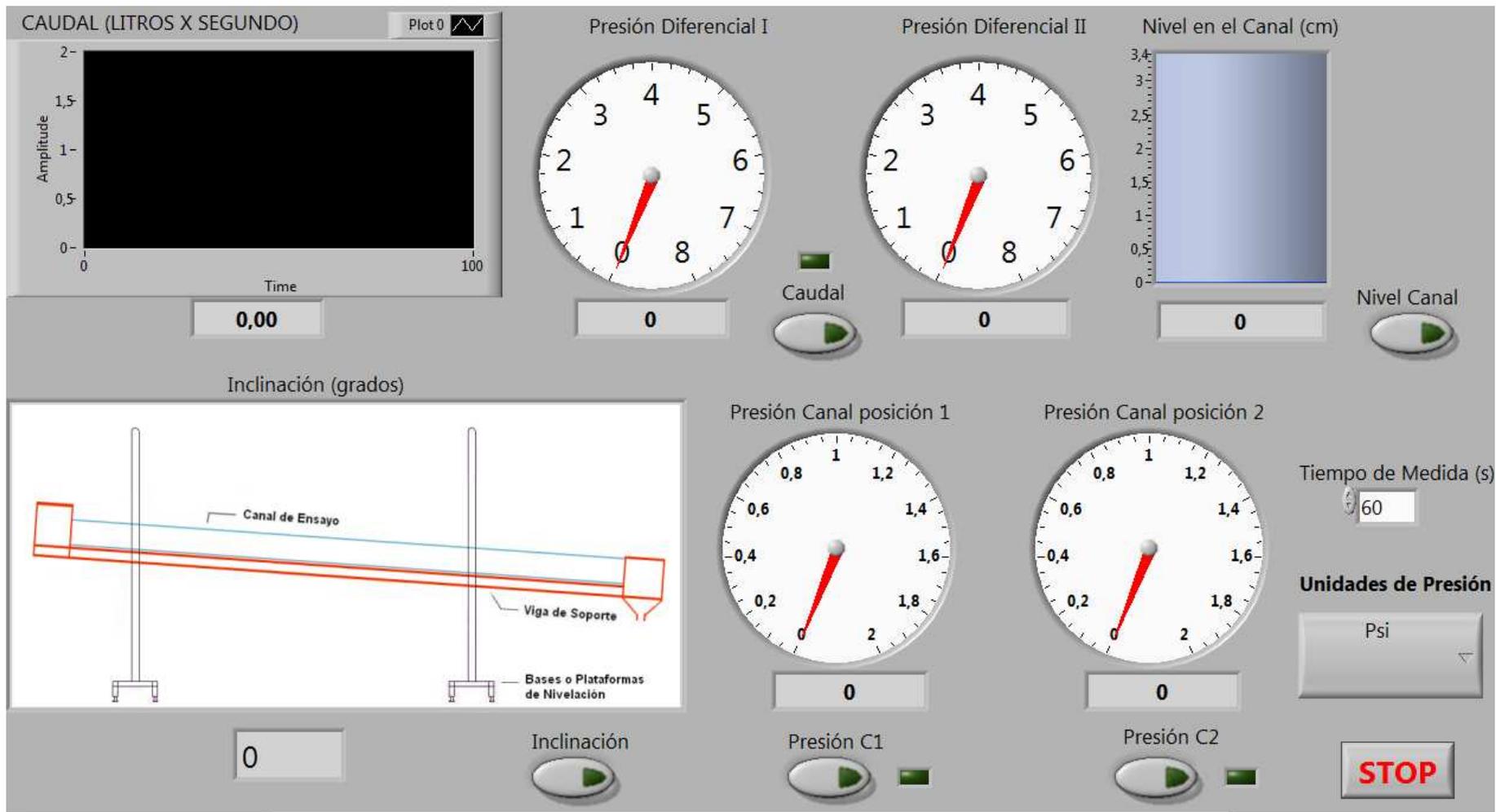


Figura 86. Vista del panel frontal del programa de control y adquisición de datos.

### 7.3. FIRMWARE

Como se ha mencionado anteriormente, el programa del microcontrolador obedece las órdenes dadas por el operador del software diseñado para la medida y adquisición de datos. Mediante estas órdenes se controla la secuencialidad de la digitalización de las señales acondicionadas de los sensores y la transmisión hacia el ordenador.

El programa comienza con la espera de un carácter enviado por el programa diseñado en Labview, si el carácter es coincidente con lo esperado, se direcciona mediante el puerto 2 el control del ADC0808. La señal digitalizada del canal escogido es recibida por el puerto 1 del microcontrolador. Esta señal que es un número entre 0 y 255 se fragmenta en unidades, decenas y centenas y es transmitido como 3 caracteres hacia el computador. Una vez se hace este envío, el programa del microcontrolador espera de nuevo la selección de un canal del ADC0808 para ser obtenida una nueva medida de uno de los sensores escogido.

## 8. MONTAJE EN EL LABORATORIO

A continuación se muestra en imágenes el montaje de los sensores en la máquina.

### 8.1. SENSORES OPTICOS

8.1.1. Nivel. Como se observa en las gráficas (figuras 87 y 88), el sensor está ubicado sobre el canal de transporte en una estructura sujeta a la viga. Esta estructura es rígida no presenta oscilaciones y la altura del sensor sobre el canal puede ser móvil de acuerdo a la calibración dada o al tamaño de la tubería utilizada.



Figura 87. Estructura de soporte de sensor óptico para medir nivel.

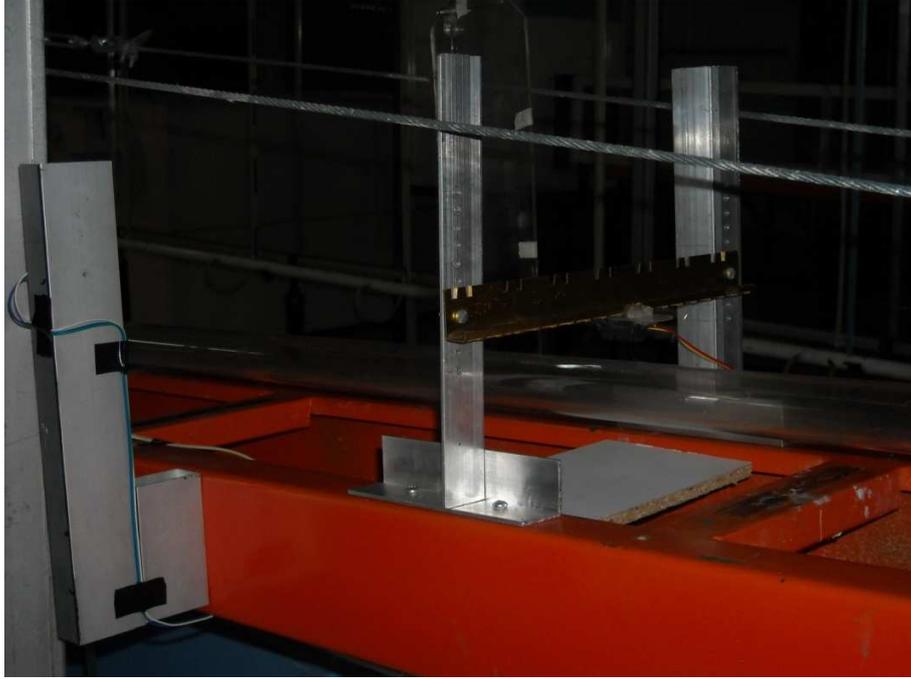


Figura 88. Estructura de soporte de sensor óptico para medir nivel, vista lateral.

8.1.2. Inclinación. A continuación se muestra el sistema de polea empleado para inclinar la viga de soporte del canal (figura 89).



Figura 89. Polea que mueve la viga de soporte del canal.

Las siguientes gráficas (figuras 90, 91, 92 y 93) señalan la ubicación del sensor óptico paralelo a la viga de soporte, y la instalación de una lamina de reflexión anclada al piso y reforzada con un soporte que le impide oscilaciones y movimientos indeseados para el sistema.



Figura 90. Disposición del sensor óptico paralelo a la viga de soporte.



Figura 91. Sistema de reflexión vista superior



Figura 92. Soporte de la lámina de reflexión anclado al piso.



Figura 93. Refuerzo lateral de la lámina de reflexión.

## 8.2. SENSORES DE PRESIÓN

8.2.1. Presión. En las siguientes gráficas (figura 94 y 95), se observa la utilización de cajas telefónicas para la ubicación de los sensores de presión MPX2050GP. Se utilizan estas cajas porque tienen el tamaño apropiado para la ubicación de los sensores. Además poseen entradas para conectores RJ11 que permite que los sensores sean fácilmente conectables a la caja que contiene los circuitos de acondicionamiento, control y comunicación del proyecto.

Los conectores RJ11 poseen cuatro terminales para los cuatro pines que posee el sensor.



Figura 94. Ubicación de los sensores de presión en cajas telefónicas.



Figura 95. Conexión de los pines del sensor de presión con el conector RJ11

En las siguientes figuras 96, 97, 98 y 99 se muestra la implementación de los sensores de presión dada gracias a la instalación de piezómetros en las uniones de teflón existentes en el canal. En estas derivaciones se puede llevar una medida análoga de presión así como la medida del sensor electrónico.



Figura 96. Instalación del piezómetro en la unión de teflón.

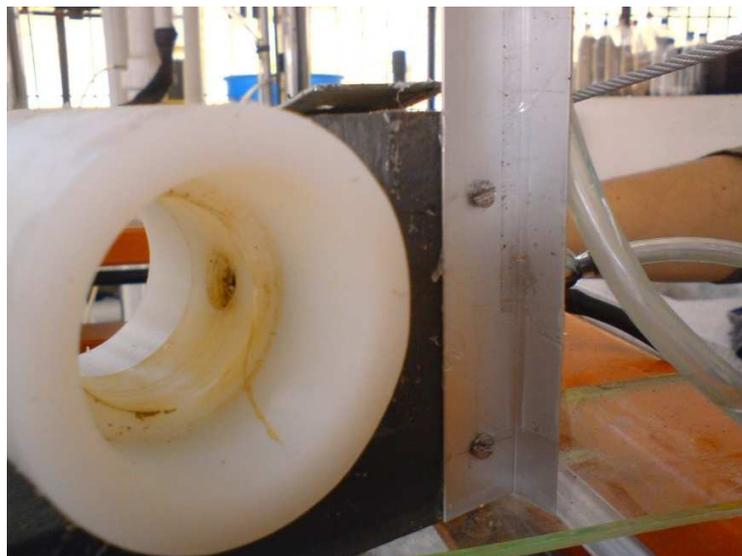


Figura 97. Abertura del agujero para la instalación del piezómetro en la unión de teflón.



Figura 98. Derivación en el piezómetro para la medida análoga y la medida digital.

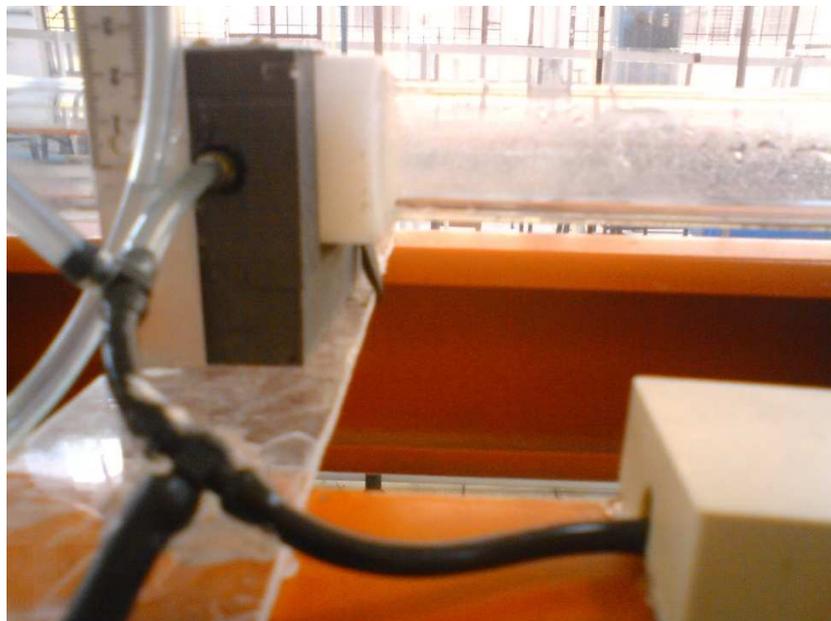


Figura 99. Acercamiento a la derivación existente.

8.2.2.Caudal. Las siguiente imagen (figura 100), señalan las derivaciones hechas para la toma de las medidas de presión que permitan hacer el cálculo de caudal.



Figura 100. Conexión entre los sensores y las derivaciones.

## 9. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 9.1. NIVEL

Por medio de la válvula reguladora de la motobomba y de la posición del soporte se puede graduar el nivel del flujo de agua en el canal, respecto a esto se observa en Labview una detección de estos cambios con un tiempo de respuesta aceptable. A continuación se muestran algunos de los datos obtenidos en la tabla 5:

Prueba	Medición Manual (mm)	Medición Electrónica (mm)
1	0	0
2	0	0,14521739
3	0	0,14521739
4	0	0
5	0	0

Tabla 5. Datos canal nivel vacio

Los anteriores datos muestran que el sistema responde adecuadamente en ausencia de líquido, las medidas en las que no se muestra un cero se dan debido a pequeñas gotas que quedan suspendidas o en el fondo del canal pero no representan una fluctuación considerable. A continuación en la tabla 6 se muestran otros datos de las pruebas.

Prueba	Medición Manual (mm)	Medición Electrónica (mm)	Error relativo (%)
1	1,5	1,45217	3,18
2	1,5	1,59739	6,49
3	1,5	1,45217	3,18
4	1,5	1,59739	6,49
5	1,5	1,45217	3,18

Tabla 6. Datos Canal nivel medio

Para este nivel en el canal se pueden observar algunos saltos en las medidas, esto se debe a que es imposible lograr una lamina de agua completamente estable, el flujo presenta en la superficie variaciones debido a los empalmes de teflón y a la motobomba en sí, pero cabe resaltar que el sistema es capaz de responder a estos cambios sustancialmente pequeños dentro de las posibilidades de su resolución, mientras en una medición manual se debe aproximar un valor subjetivo. La siguiente tabla 7 muestra los datos obtenidos para la prueba realizada en canal lleno.

Prueba	Medición Manual (mm)	Medición Electrónica (mm)	Error relativo (%)
1	3,34	3,34	0
2	3,34	3,34	0
3	3,34	3,34	0
4	3,34	3,19478	4,34
5	3,34	3,34	0

Tabla 7. Datos canal nivel lleno

Cuando se realizan pruebas con canal lleno sin turbulencias es donde se observa el comportamiento más uniforme de las pruebas, esto ya que el sensor no obtiene interferencias por parte del sistema como las gotas o el flujo irregular.

Rango: 0 mm – 33,4 mm

Alcance: 33,4mm – 0 mm  
33,4mm

Resolución: **1,4521173913**

$$\text{Error Relativo: } \left| \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| * 100$$

Teniendo en cuenta los datos de las anteriores tablas se tiene que el error relativo es de 2,686%

## 9.2. CAUDAL

Como se ha explicado anteriormente, el caudal se mide por medio de un sistema de tubos de orificio los cuales crean una diferencia de presión entre 2 puntos, lo cual nos representa una medida de caudal, para corroborar los datos arrojados por el sistema electrónico de adquisición de datos, se realizó 5 pruebas simultaneas de aforo, a continuación se muestran los datos obtenidos en la tabla 8 y la representación gráfica en la figura 101.

Prueba	Aforo (L/seg)	Promedio Sistema Electrónico (L/seg)	Error (L/seg)	Error Relativo (%)
1	0,733944954	0,66173015	0,072214804	9,84
2	1,226993865	1,180856	0,046137865	3,76
3	1,433691756	1,392961	0,040730756	2,84
4	1,6	1,555520	0,04448	2,78
5	1,716738197	1,658213	0,058525197	3,40

Tabla 8. Comparación datos utilizando 2 sistemas de medida

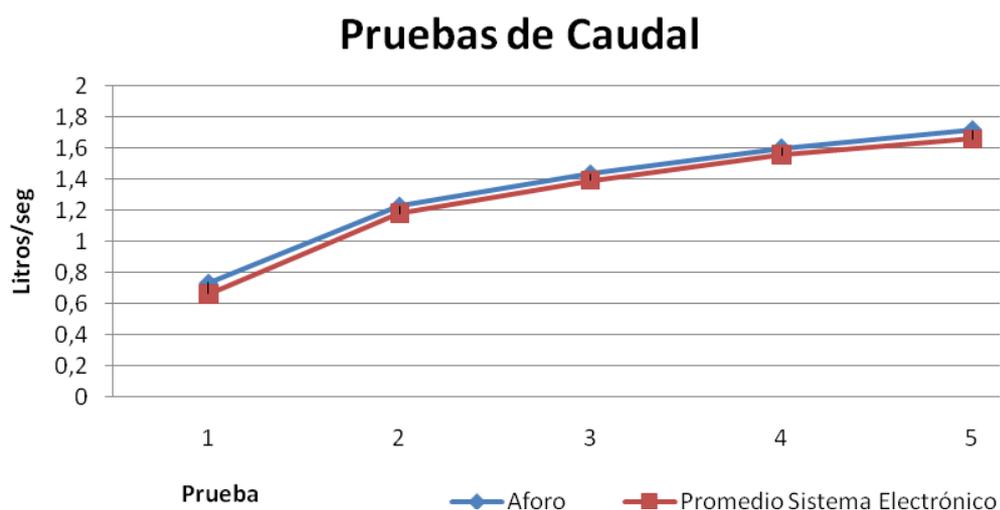


Figura 101. Gráfica datos de caudal obtenido con los 2 sistemas de medida

Las pruebas de aforo son realizadas utilizando un tanque calibrado de 17 litros de capacidad, se cronometra el tiempo en que el tanque se llena por completo y teniendo en cuenta estos datos tiempo y capacidad se deduce el caudal del proceso. El sistema electrónico toma datos durante 60 segundos y posteriormente estos datos se promedian para realizar una comparación.

El error promedio en las pruebas es de 0,0524 litros por segundo, lo cual es aceptable teniendo en cuenta que las pruebas de aforo aunque es un sistema de medida confiable, no es muy exacto ya no se puede garantizar que una prueba sea igual a otra, sin embargo se

puede observar un correcto funcionamiento por parte del sistema de adquisición de datos diseñado.

Para este sistema las especificaciones de instrumentación son las siguientes:

Rango: 0,5 litros/seg – 1,7 litros/seg

El rango está determinado por la potencia de la motobomba, la cual en las pruebas realizadas no pudo superar el caudal mostrado anteriormente, para mediciones de caudal bajo, el sistema de tubo de orificio usado en esta etapa generaba algunas inconsistencias debido a la turbulencia de la motobomba por lo cual se determinó el rango inferior en ese límite, donde se garantiza un funcionamiento correcto.

Alcance (span) = 1,7 Litros/seg – 0,5 Litros/seg  
= 1,2 Litros/seg

Resolución = 0,0101

Error Relativo:  $\left| \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| * 100$

Teniendo en cuenta la anterior tabla se determina que el error relativo es 4,524%

### 9.3. PRESIÓN

Se realizaron pruebas a diferentes presiones para comprobar el funcionamiento de los sensores, a continuación se muestran los datos obtenidos en la tabla 9 y su representación gráfica en la figura 102.

SENSOR 3				
Prueba	Piezómetro (cm de columna de agua)	Medición Electrónica (cm de columna de agua)	Error (%)	Error Absoluto (cm de columna de agua)
1	33,3	33,947514	1,94448649	0,647514
2	28	28,343794	1,22783571	0,343794
3	22,8	21,983259	3,582197368	0,816741
4	18,6	17,818212	4,20316129	0,781788
5	12	10,875455	9,371208333	1,124545

Tabla 9. Pruebas Sensor 3 a diferentes presiones

### Pruebas Sensor 3

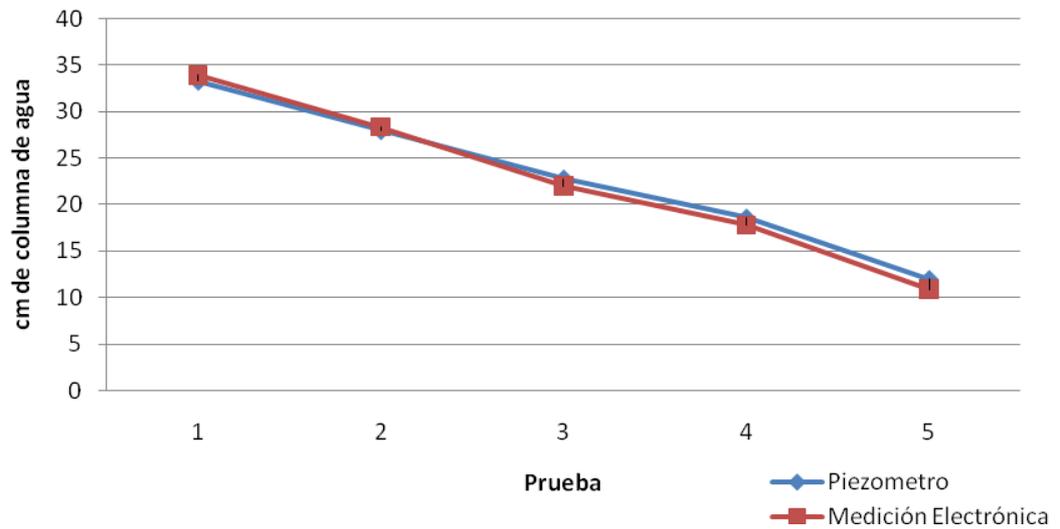


Figura 102. Gráfica de resultados en sensor 3

Dado que los sensores de presión ubicados en el canal poseen diferentes calibraciones, su caracterización se realiza de forma individual, para el sensor 3 se tiene:

Rango: 0 psi – 2 psi

Alcance: 2 psi – 0 psi  
2 psi

Resolución: **0,007367782436**

$$\text{Error Relativo: } \left| \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| * 100$$

Teniendo en cuenta la tabla 9, se obtiene que el error relativo es 4,06577784%

Se realizaron para el sensor 4 pruebas similares que para el sensor 3 en donde los datos obtenidos se muestran en la tabla 10 y su representación gráfica en la figura 103.

SENSOR 4				
Prueba	Piezómetro (cm de columna de agua)	Medición Electrónica (cm de columna de agua)	Error Relativo (%)	Error Absoluto
1	18,3	17,936962	1,98381421	0,363038
2	15,5	14,806406	4,4748	0,693594
3	12,6	12,197555	3,19400794	0,402445
4	10,6	9,427577	11,0605943	1,172423
5	7,2	5,807932	19,3342778	1,392068

Tabla 10. Pruebas Sensor 3 a diferentes presiones

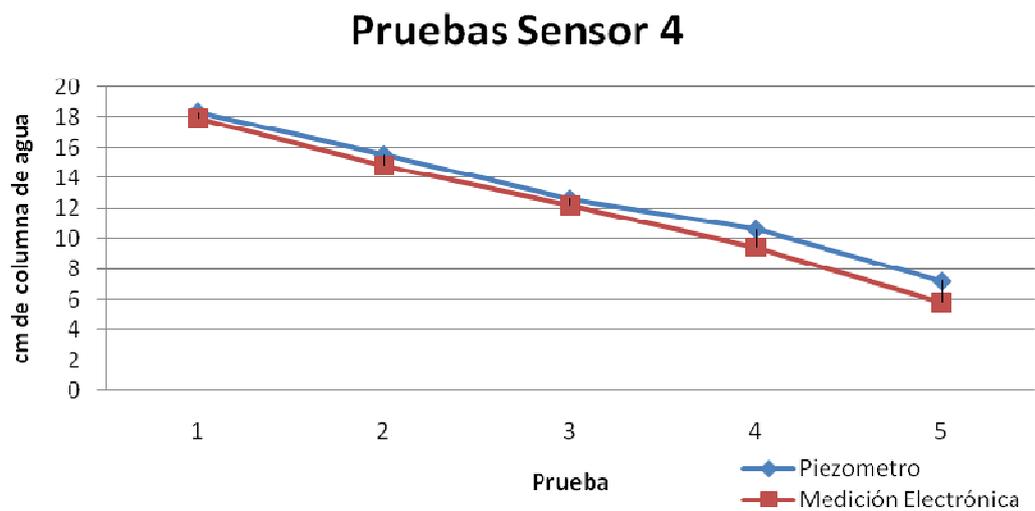


Figura 103. Gráfica de resultados en sensor 4

Rango: 0 psi – 2 psi

Alcance: 2 psi – 0 psi  
2 psi

Resolución: **0,007378321872**

$$\text{Error Relativo: } \left| \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| * 100$$

Teniendo en cuenta la tabla 10 se obtiene que el error relativo es 8,009498852%

Los datos obtenidos muestran poca diferencia entre los 2 sistemas, los errores se deben a perdidas en baja presión dado que en los empalmes de teflón en donde se encuentra la toma, no se presenta un acondicionamiento óptimo, por esta razón se presentan fluctuaciones mayores entre las medidas.

#### 9.4. INCLINACIÓN

Dado que la ubicación del soporte se puede graduar un posiciones intermedias entre cada valor de ángulo y ya que en la calibración de esta etapa se tomaron rangos de datos para determinar el comportamiento del sistema, las pruebas se enfocaron a determinar qué porcentaje de los ángulos abarcan estos rangos. Para esto se observó a qué distancia del recorrido de un ángulo se realizaba el cambio de valor del mismo, los resultados se muestran en la tabla 11.

Angulo (°)	Rango de Distancia (cm)	
	Min	Max
-4	-23,4	-18,1
-3	-18,1	-13,1
-2	-13,1	-7,8
-1	-7,8	-2,6
0	-2,6	2,7
1	2,7	7,6
2	7,6	12,7
3	12,7	18,0
4	18,0	23,2
5	23,2	28,5
6	28,5	34,1
7	34,1	39,5
8	39,5	45,9
9	45,9	50,8
10	53,8	55,9

Tabla 11. Rango de alcance para cada valor de ángulo

El resultado obtenido con las pruebas nos garantiza que los rangos definidos en la calibración de este sistema de medida abarcan de manera satisfactoria y acorde las posiciones determinadas en cada ángulo.

Rango:  $-4^{\circ}$  -  $10^{\circ}$

Alcance:  $10^{\circ}$  -  $(-4^{\circ})$  psi  
 $14^{\circ}$

Resolución:  $1^{\circ}$

## 10. CONCLUSIONES

Las conclusiones están basadas en lo establecido en los objetivos planteados en el anteproyecto y las comparaciones realizadas entre el sistema de medición que se empleaba anteriormente y el sistema de medición y adquisición de datos desarrollado en el proyecto.

En cuanto al objetivo principal de este proyecto se puede deducir que se cumplió en totalidad ya que se logró desarrollar un sistema electrónico de medición y adquisición de datos de las variables físicas de interés en la máquina de transporte hidráulico de mezclas sedimentadas y no sedimentadas.

Los objetivos específicos del proyecto se cumplieron a cabalidad. Se analizaron y eligieron los métodos electrónicos que mejor se adecuaron a las necesidades y condiciones que se presentaban tanto en la máquina como en el laboratorio de hidráulica. Se probaron varios sistemas de medición para cada variable de interés estableciendo ventajas y desventajas que determinaron la mejor solución para cada caso. De este modo se escogieron sensores ópticos y sensores de presión piezorresistivos que se adecuaron para realizar las medidas de nivel, caudal, inclinación y presión. Estos sensores presentaron las mejores respuestas tanto en precisión, exactitud y velocidad de transmisión, además son comerciales y de fácil adquisición en nuestro medio.

Mediante el desarrollo de un programa en el software Labview se realizó un monitor de usuario con la visualización y cómputo de todos los datos concernientes a la adquisición de datos realizada. El programa realizado es de fácil manejo para el operario y ofrece una visualización dinámica de la variación de las medidas. Además puede controlar el tiempo de medición y las unidades de algunas variables de importancia. El programa es capaz de ofrecer las medidas obtenidas en hojas de cálculo para su posterior estudio.

Las Pruebas de campo realizadas permitieron medir la efectividad del sistema y su mejoría en relación a las medidas análogas que se obtenían anteriormente. En primer lugar se elimina el error de la percepción humana como instrumento de medición, los sensores electrónicos funcionan con principios físicos estables, estandarizados en cuanto a precisión repetitividad y velocidad. La adquisición de datos mejora ostensiblemente, debido a que se elimina la manipulación manual de plantillas con las medidas obtenidas con los sistemas análogos por parte de un operario.

El sistema permite que la instrumentación de la máquina de transporte hidráulico sea un trabajo amigable y no una responsabilidad tortuosa y laboriosa por parte de un operario que debía realizar muchas tareas al tiempo.

Gracias al diseño utilizado para la conexión de los sensores al hardware principal, se obtuvo un sistema portátil que puede ser usado en otros sistemas de estudio hidráulico dentro del laboratorio, lo cual expande los alcances del proyecto.

Con este proyecto se demuestra que la aplicación de los conocimientos obtenidos en el programa de Ingeniería Electrónica puede contribuir mediante la investigación y el diseño en la optimización de equipos que no están acordes a las tecnologías de actualidad necesarias para el mejoramiento de los procesos.

El proyecto mejora los estudios realizados en la máquina de transporte hidráulico contribuyendo en la investigación realizada en este prototipo de gran importancia en el campo de la hidráulica.

## 11. RECOMENDACIONES

Implementar una puesta a tierra en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño, ya que de no existir afecta considerablemente el funcionamiento de los sensores y la electrónica del proyecto, toda vez el lugar cuenta con un gran número de motobombas que generan ruido.

Conectar el laboratorio de Mecánica de Fluidos a la tierra física del laboratorio de Electrónica. Esto mejora significativamente el funcionamiento general del proyecto, sin embargo es una solución temporal ya que la elaboración de una puesta a tierra debe contener un estudio previo de todos los equipos involucrados y una inversión considerable.

Buscar una adecuada solución para este problema general en la Universidad de Nariño que ha sido estudiado y considerado pero no se han tomado las medidas respectivas. La intención de mejorar las máquinas y laboratorios existentes mediante el desarrollo de proyectos como este, debe ser un parámetro relevante en la ejecución de un plan para dar solución a este enorme problema que tiene la universidad.

Utilizar un conversor análogo digital de mayor resolución. El dispositivo de conversión análogo digital dispuesto tiene una resolución de 8 bits suficiente para las señales trabajadas por los sensores. Sin embargo si se mejora la calidad de estos se vería necesario la utilización de un conversor de mayor resolución.

Mejorar el sistema de movimiento de la viga de soporte. El sistema diseñado para la medida de inclinación puede ser mejorado en su resolución si se mejora el sistema de polea existente para desplazar la viga de soporte. En el sistema actual de polea se generan movimientos fuertes y oscilaciones que influyen negativamente en el comportamiento del sensor.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D.M. Considine, Process Instruments and Control Handbook, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1974
- E.B. Jones, Instrument Technology, Vol. 1, Measurement of Pressure, Level and Temperature, Butterworth & Co., 1974.
- Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Gulf Publishing Company, 1986.
- Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Gulf Publishing Company, 1986.
- ANSI/ISA-S5.1 — Instrumentation Symbols and Identification.
- A. Creuss, Instrumentación Industrial, Sexta Edición, Ed. Alfa Omega.
- Arias Estrella M., Taquez Muñoz E., “Estudio experimental en laboratorio del transporte hidráulico de mezclas no sedimentables de aguasólidos en canales abiertos-segunda parte”, Universidad de Nariño 2007.
- <http://bc.inter.edu/facultad/arincon/encoderIncrementales.pdf>
- [http://www.infopl.net/Documentacion/Docu\\_Instrumentacion/infoPLC\\_net\\_Medida\\_Desplazamiento.pdf](http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_Instrumentacion/infoPLC_net_Medida_Desplazamiento.pdf)
- [http://www.infopl.net/Documentacion/Docu\\_Instrumentacion/infoPLC\\_net\\_MEDICION\\_DE%20NIVEL.pdf](http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_Instrumentacion/infoPLC_net_MEDICION_DE%20NIVEL.pdf)
- [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/art2/pdf/teoria.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf)

## ANEXO A CODIGO FUENTE DEL FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR

```
ORG 0000H

INICIO: MOV P2,#0
        ACALL SERIAL

                AJMP INICIO

SERIAL:   MOV TMOD,#20H
        MOV TH1,#253
        MOV SCON,#50H

                SETB TR1

START: ACALL READ
        CJNE A,#'A',preg2
        MOV P2,#1

                MOV P2,#0

                MOV P2,#9
                AJMP SIGA

preg2:   CJNE A,#'B',preg3
        MOV P2,#10

                MOV P2,#2

                MOV P2,#10
                AJMP SIGA

preg3:   CJNE A,#'C',preg4
        MOV P2,#11

                MOV P2,#3

                MOV P2,#11
                AJMP SIGA

preg4:   CJNE A,#'D',preg5
        MOV P2,#12

                MOV P2,#4

                MOV P2,#12
                AJMP SIGA

preg5:   CJNE A,#'E',preg6
        MOV P2,#13

                MOV P2,#5

                MOV P2,#13
                AJMP SIGA

preg6:   CJNE A,#'F',INICIO
        MOV P2,#14

                MOV P2,#6

                MOV P2,#14
```

```

SIGA: CLR RI
        CLR TI
        MOV A,P1
        MOV B,#10
        DIV AB
        MOV R2,B
        MOV B,#10
        DIV AB
        ACALL ONE
        ACALL TX

        MOV A,B
        ACALL ONE
        ACALL TX

        MOV A,R2
        ACALL ONE
        ACALL TX

        RET

TX:     MOV SBUF,A

AQUI:  JNB TI,AQUI
        CLR TI
        RET

START2: LJMP START

READ:  JNB RI,READ
        CLR RI
        MOV A,SBUF
        RET

ONE:   CJNE A,#1,TWO
        MOV A,#'1'
        RET

TWO:   CJNE A,#2,THREE
        MOV A,#'2'
        RET

THREE: CJNE A,#3,FOUR
        MOV A,#'3'
        RET

FOUR:  CJNE A,#4,FIVE
        MOV A,#'4'
        RET

FIVE:  CJNE A,#5,SIX
        MOV A,#'5'
        RET

SIX:   CJNE A,#6,SEVEN
        MOV A,#'6'
        RET

SEVEN: CJNE A,#7,EIGHT
        MOV A,#'7'
        RET

EIGHT: CJNE A,#8,NINE
        MOV A,#'8'
        RET

NINE:  CJNE A,#9,ZERO
        MOV A,#'9'
        RET

ZERO:  CJNE A,#0,START2
        MOV A,#'0'
        RET

```

ANEXO B. IMÁGENES COMPLEMENTARIAS

