

**IMPLEMENTACIÓN DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE
MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA NTC1063 PARA EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN
DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.**

ALVARO DANIEL GÓMEZ ALVAREZ



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2013

**IMPLEMENTACIÓN DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE
MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA NTC1063 PARA EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN
DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.**

**AUTOR:
ALVARO DANIEL GÓMEZ ALVAREZ**

PROYECTO DE GRADO

**DIRECTOR DEL PROYECTO:
ESP. JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2013

Nota de Aceptación

Firma de Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Septiembre 2013

*A mis padres Socorro y Alvaro, y a mis hermanas
por estar ahí siempre, por cada una de esas
palabras de aliento en el momento indicado.
A mi novia Paola Andrea por su apoyo y confianza.*

Alvaro Daniel Gómez Alvarez

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios, por estar conmigo, por brindarme la fortaleza e iluminar mi caminar, que muchas veces estuvo lleno de triunfos y de obstáculos que superar, gracias a esto soy la persona que soy hoy en día.

A mis padres por su apoyo incondicional, por confiar en mis capacidades y darme la oportunidad de estudiar para ser profesional.

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla Saavedra, por su colaboración, acompañamiento, conocimiento y amistad, los cuales me ayudaron a desarrollar este gran logro en mi vida.

A la ingeniera Leidy Johanna Olarte Silva, por su ayuda, colaboración y apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto.

Al ingeniero Nelson y a los integrantes del laboratorio de metrología, por brindarme la oportunidad de tener una experiencia trabajo y brindarme su conocimiento y ayuda durante la visita técnica en el Acueducto Municipal de Bucaramanga AMB.

Al ingeniero Gerardo Porras, por brindarme su apoyo en la visita técnica.

Al Grupo de docentes de la Facultad de Ingeniería Electrónica, por transmitirme el conocimiento y experiencias de vida para desarrollarme como profesional íntegro.

A los diferentes compañeros de estudio que me colaboraron durante el periodo de montaje del banco de flujo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO REFERENCIAL	3
1.1 EL FLUJO	3
1.1.1 Clasificación del Flujo.....	4
1.1.2 Fenómenos físicos que Afectan el Estado del Flujo.....	5
1.2 NORMA TÉCNICA COLOMBIA NTC1063.....	8
1.2.1 Definición	8
1.2.2 Requisitos de Instalación.	11
1.2.3 Ensayo para Determinar los errores de Indicación.....	12
2. REINGENIERÍA DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.....	14
2.1 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 1	14
2.1.1 Etapa de Calibración de Equipos	15
2.1.2 Etapa de Pérdidas de Presión.....	16
2.2 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 2.	17
2.2.1 Depuración del Banco de Flujo Fase 1.	17
2.2.2 Acondicionamiento del Laboratorio para Cumplir los Requerimientos Básicos.....	20
2.3 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 3.	20
2.3.1 Depuración del Banco de la Fase 2	20
2.4 PROYECCIÓN FINAL DEL BANCO PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO....	24
2.4.1 Diseño Final para la Medición de Flujo y Pérdidas.....	24

3. IMPLEMENTACIÓN DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA Y SU ADECUACIÓN A LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO.....	27
3.1 ACCESORIOS DEL CIRCUITO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DEL BANCO DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.....	27
3.1.1 Tanques Volumétricos de Calibración.....	27
3.1.2 Bomba Centrífuga.	29
3.1.3 Variador de Velocidad.....	30
3.1.4 Válvulas Solenoides.....	31
3.1.5 Sensores Capacitivos.....	32
3.2 MONTAJE DEL GABINETE ELECTRICO	33
3.3 MONTAJE DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE FLUJO.....	35
3.4 DIAGRAMA ELÉCTRICO Y P&ID DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN.....	37
3.5 CAUDALES DE PRUEBA PARA EL BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1063.....	38
3.5.1 Pruebas de Calibración Usando los Tanques Volumétricos.....	39
3.5.2 Pruebas de Calibración Usando el Sensor Electromagnético como Patrón de Medición.	40
4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, CONTROL Y VISUALIZACIÓN DEL BANCO DE FLUJO DE AGUA.....	43
4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS COMPACTDAQ.....	43

4.1.1	Adquisición de Señales del Banco de ensayos y Calibración del Banco de Flujo de Agua.	47
4.1	DISEÑO DEL HMI PARA EL SISTEMA SCADA DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.	50
4.1.1	Programa de Control y Adquisición de Datos.....	50
4.1.2	Control de llenado de los Tanques Volumétricos de Calibración.	52
4.1.3	Control de Vaciado de los Tanques Volumétricos de Calibración.....	55
4.1.4	Adquisición de la Señal de Corriente del Transmisor de Flujo E&H...57	
5.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.....	60
5.1	COMISIONAMIENTO DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.	60
5.1.1	Chequeo Preliminar.....	60
5.2	PUESTA EN MARCHA DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE FLUJO.	63
5.2.1	Puesta en Marcha del Tablero Eléctrico y de Control.	63
5.2.2	Puesta en Marcha de los Variadores y las Bombas Centrifugas	64
5.2.3	Válvula Solenoides y Sensores Capacitivos.	69
5.3	PRUEBAS DE VOLUMETRÍA	71
5.4	ELABORACIÓN DE GUÍA PRÁCTICA PARA EL LABORATORIO	73
	RECOMENDACIONES.....	74
	CONCLUSIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Instrumentos de medición de flujo.	3
Figura 2. Flujo Laminar.	4
Figura 3. Flujo Turbulento. ⁶	5
Figura 4. Fenómeno de vena contraída y expandida.	6
Figura 5. Fenómeno de turbulencia en el agua.....	7
Figura 6. Banco de Flujo Fase 1, Etapa de calibración.....	15
Figura 7. Banco de flujo Fase 1, Etapa de pérdidas de presión.	16
Figura 8. Banco de ensayo y calibración Fase 2.....	18
Figura 9. Banco de ensayos y calibración Fase 2 espacio real.	19
Figura 10. Tanques de calibración Fase 3.....	21
Figura 11. Alimentación tanques de calibración.....	22
Figura 12. Tablero de control.	23
Figura 13. Proyección final del banco de Ensayos y calibración.....	24
Figura 14. Depuración del banco de ensayos y calibración.	26
Figura 15. Tanques de Calibración.	28
Figura 16. Bomba centrífuga de 2 HP.....	29
Figura 17. Variador de velocidad.	30
Figura 18. Válvula solenoide KTS.	31
Figura 19. Soporte sensor capacitivo.....	32
Figura 20. Sensor capacitivo AUTONICS.	33
Figura 21. Gabinete eléctrico y de control.....	34
Figura 22. Instalación del Frame, bombas y Tanques.	36
Figura 23. P&ID del banco de flujo.....	37
Figura 24. Diagrama eléctrico del tablero de control.....	38
Figura 25. Sistema de adquisición de datos.....	44

Figura 26. Módulo analógico de corriente.	45
Figura 27. Módulo de entradas digitales.	46
Figura 28. Módulo de entradas digitales.	47
Figura 29. Sensores capacitivos.	49
Figura 30. Transmisor de flujo E&H.	49
Figura 31. Módulos de procesos de LabView.	51
Figura 32. Módulo express de entrada.....	52
Figura 33. Llenado de los tanques.	53
Figura 34. Pantalla HMI de llenado de tanques.	54
Figura 35. Protección de bombas.	55
Figura 36. Vaciado de los tanques.....	56
Figura 37. Pantalla HMI del Vaciado de los Tanques.	57
Figura 38. Adquisición y transformación de la señal análoga.	58
Figura 39. Pantalla HMI del funcionamiento del sensor.	59
Figura 40. Conexión eléctrica principal.	63
Figura 41. Curva característica Bomba PEDROLLO.	64
Figura 42. Curva característica Bomba BARNES.	65
Figura 43. Especificaciones Bombas.	65
Figura 44. Conexiones eléctricas de los variadores.....	66
Figura 45. Válvulas solenoides.	69
Figura 46. Sensores capacitivos implementados.....	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Proyección del banco de ensayos y calibración.....	25
Tabla 2. Caudales de calibración con tanques.....	40
Tabla 3. Caudales de calibración con sensor patrón.....	42
Tabla 4. Aforación de los tanques.....	72
Tabla 5. Volumetría usando sensor E&H.....	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Guía de Laboratorio.....	82
Anexo B. Manual Bomba BARNES 1515HHE23.....	88
Anexo C. Manual de Variador de velocidad DANFOSS FC-51.....	90
Anexo D. Manual de sensor capacitivo AUTONICS CR18-8DP.....	160
Anexo E. Manual de sistema de Adquisición de Datos NI.....	161
Anexo F. Tabla de señales.....	180
Anexo G. Tabla de componentes.....	181
Anexo H. Diagrama de proceso P&ID.....	182
Anexo I. Diagrama de potencia.....	183

GLOSARIO

Caudal: Es la cantidad de fluido que pasa o atraviesa una superficie por unidad de tiempo. La superficie por donde transita el fluido es abierta, por ejemplo el cause del río.²

Flujo: Es la cantidad de fluido que pasa por una superficie cerrada, por ejemplo algún tipo de fluido que circula por tubería.²

Frame Mecánico: Es el armazón que contiene todos los elementos que posee el banco como: sensores, válvulas, tanque de calibración, manómetros electroválvulas, sensores de temperatura, tubería y accesorios. Es decir es el Protoboard que contiene todos los elementos.

Histéresis: La histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.²

Precisión: Es el grado de reproductibilidad de las mediciones adquiridas por un instrumento.²

Rotámetro: Son instrumentos utilizados para medir caudales, tanto de líquidos como de gases que trabajan con un salto de presión constante. Consta de un tubo de vidrio de baja conicidad, en cuyo interior se encuentra el elemento sensible al caudal que circula por el tubo, al cual se le denomina flotador.¹⁹

Trazabilidad: Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que pueda relacionarse con patrones establecidos, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones con todas las incertidumbres determinadas.²⁰

kS/s (kilosamples por segundo): Es una unidad de medida que hace referencia a la velocidad de muestreo de un dispositivo electrónico en función de las muestras.

Aforar: Proceso en el cual se determina el volumen de un tanque o recipiente.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC1063 PARA EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

AUTOR: ALVARO DANIEL GÓMEZ ALVAREZ

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

Se desarrolló un rediseño del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua de manera tal que cumpliera con los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC 1063 y que a su vez se adaptará a las condiciones del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana; para este rediseño se tuvo en cuenta lo estipulado en la fase 1 y fase 2 del proyecto. Lo primero fue desarrollar un diseño de los tanques patrones, en los cuales se deseó tener una capacidad de almacenamiento máxima de 240 litros lo cual permite realizar pruebas de calibración con caudales superiores a 100 l/min, la ubicación de los tanques patrones se tomó de la distribución de espacio hecha en la fase 2. Para el diseño de los tanques patrones y la distribución de la tubería se usó el software Solidwork; basando todo en los diseños de la fase 1 y 2 así como en la Norma Técnica Colombiana NTC 1063.

La fase 3 se centró en la implementación del primer anillo de calibración el cual usa el método de calibración por volumen conocido que se encuentra contemplado en la norma, el objetivo del anillo de calibración es realizar pruebas las cuales permitan parametrizar y revisar la calibración de los dispositivos de medición de flujo de agua. La proyección del banco de ensayos y calibración abarca la implementación del sistema de pérdidas por diferentes diámetros, codos y la implementación de RTDs que permitan medir la temperatura del agua a la entrada y la salida. Finalmente se elaboró el dossier del proyecto y la guía del laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Flujo, Frame mecánico, Norma tecnica Colombiana 1063, Sensor de flujo, Válvula.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT OF THESIS PROJECT

TITLE: **IMPLEMENTATION OF THE FIRST RING OF CALIBRATION OF THE BENCH FOR FLOW MEASUREMENT WATER BASED ON THE COLOMBIAN TECHNICAL STANDARD NTC1063 FOR INSTRUMENTATION LABORATORY OF THE PONTIFICIA BOLIVARIAN UNIVERSITY.**

AUTOR: **ALVARO DANIEL GÓMEZ ALVAREZ**

FACULTY: **FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING**

DIRECTOR: **JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA**

We developed a test bench redesign and calibration of water flow meters in a manner that meets the requirements of the Colombian Technical Standard NTC 1063 and that in turn is adapted to the conditions of the instrumentation laboratory at the Universidad Pontificia Bolivariana, for this redesign was taken into account as provided in Phase 1 and Phase 2 of the project. The first was to develop a tank design pattern in which it was desired to have a maximum storage capacity of 240 liters, which allows testing of calibration flows exceeding 100 l / min, the location of the tanks is made of patterns space allocation made in phase 2. For the design of the tanks and the distribution patterns of the pipe was used Solidwork software, basing everything on the designs of phase 1 and 2 and in the Colombian Technical Standard NTC 1063.

Phase 3 focused on the implementation of the first ring calibration which uses the calibration method known volume which is covered by the standard, the calibration target is ring which allow testing and review calibration measuring devices water flow. The bank's forecast covers testing and calibration system implementation losses of different diameters, elbows and implementation of RTDs to measure the water temperature at the inlet and outlet. Finally, the project developed the dossier and laboratory guide.

KEY WORDS: Mechanical Frame, Standard NTC 1063, Flow, valve, capacitive sensor.

V ° B ° DIRECTOR WORKING GRADE.

INTRODUCCIÓN

La industria, a nivel mundial, ha tenido un crecimiento acelerado que hace necesario la implementación de herramientas que permitan el control de los diferentes procesos de producción, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevos instrumentos de medida capaces de entregar información del proceso sin importar las condiciones físicas de la planta o empresa.

Al realizar la instrumentación adecuada del proceso, ésta depende de su naturaleza, teniendo en cuenta el grado de exactitud en las mediciones y el control requerido, para que, a la hora de implementar los equipos adquiridos sean implementados de la forma más conveniente, es decir, que puedan cumplir con las necesidades básicas que requiere el funcionamiento adecuado de cada proceso.¹

En este proyecto se implementó el primer anillo de calibración para el banco de flujo basado en la norma NTC 1063, para la evaluación de instrumentación industrial utilizada en la medición, control y regulación de flujo como transmisores, variadores de velocidad, válvulas y bombas, teniendo en cuenta sus principios de operación y recomendaciones de fabricante. Esto permitirá la realización de prácticas de instrumentación industrial que sirvan como guía para el aprendizaje y entrenamiento de los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Mecánica e Industrial, así como estudiantes de posgrado en la Especialización en Control e Instrumentación Industrial.

Este proyecto se dividió en varias fases siendo este proyecto la fase 3, las fases anteriores fueron:

¹ Medición de flujo: La variable más medida de la industria [en línea] <<http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-completo-instrumentacion-industrial/218-medicion-de-flujo-la-variable-mas-medida-de-la-industria>> [2 de Abril de 2013].

Fase 1: “*DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1063*”, en la cual se elaboró el diseño del banco con todos los dispositivos los cuales cumplieran con los requerimientos de la Universidad.

Fase 2: “*DEPURACIÓN DE LA INGENIERÍA DETALLADA E IMPLEMENTACIÓN BÁSICA DEL BANCO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DEL FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIA NTC 1063*” en la cual se implementó el primer Frame mecánico para la medición de flujo.

1 MARCO REFERENCIAL

1.1 EL FLUJO

El flujo es la cantidad de fluido, en general, que atraviesa una sección transversal determinada de un ducto, por unidad de tiempo. La medición de flujo de fluidos constituye un factor clave en los procesos industriales, ya que en la mayor parte de ellos interviene la manipulación o control de líquidos y gases. La medición de esta variable es de gran importancia en los procesos donde está involucrado algún tipo de fluido, ya que de esto depende el buen funcionamiento; para ello es necesario realizar las respectivas verificaciones de los sensores de flujo y su calibración (figura 1) para tener la certeza de que el equipo se encuentra operando correctamente.²

Figura 1. Instrumentos de medición de flujo.³



² ANTONIO CREUS SOLÉ, Instrumentación Industrial, 1997 ALFAOMEGA, 6 ed, Barcelona, España: Marcombo ISBN 958-682-135-8. [17 de Abril de 2013]

³ Imagen tomada en: <<http://todoproductividad.blogspot.com/2012/10/tecnologias-para-la-medicion-del-caudal.html>> [5 de Agosto de 2013].

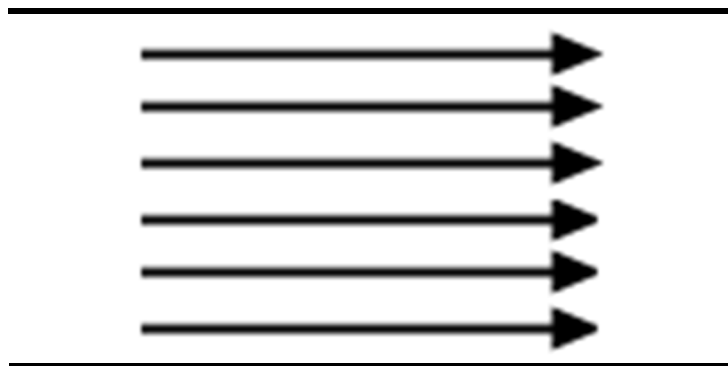
1.1.1 Clasificación del Flujo

a. Flujo Laminar.

Cuando la velocidad es baja, la fuerza de inercia es mayor que la fricción, las partículas se desplazan con un movimiento y con una trayectoria definida. Todas las partículas que pasan por un punto en el campo de flujo siguen la misma trayectoria. Este comportamiento del fluido se denomina como “flujo laminar”, es decir que las partículas se desplazan en forma de láminas o capas.⁴

Si un flujo posee una velocidad constante tiene un comportamiento estacionario, esto se debe a que las capas de moléculas del fluido se mueven una junto a otra uniformemente, siendo un movimiento ordenado.⁵ Cuando el fluido tiene mayor viscosidad, mayor es su tendencia a poseer flujo laminar, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Flujo Laminar.⁶



⁴FLUJO EN REGIMEN ESTACIONARIO. [en línea] Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/112803082/Flujo-en-regimen-estacionario>> [5 de Agosto de 2013].

⁵ MIKEL IZQUIERDO, Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, 2008 editorial medica panamericana, 311p. [17 de Julio de 2013].

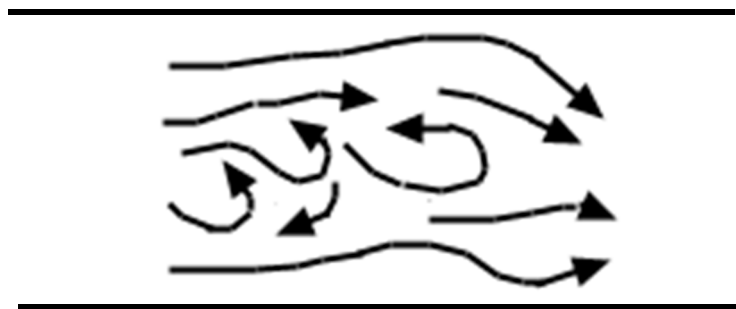
⁶ Imagen tomada en: <<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html>> [17 de julio de 2013].

b. Flujo Turbulento.

El flujo es turbulento, cuando las trayectorias de las partículas se entrecruzan sin ningún tipo de patrón establecido, lo cual se presenta de forma contingente y aleatoria (figura 3). Esto sucede cuando la velocidad que posee el fluido es alta, consume mucha más energía y produce más pérdidas de carga.⁴

El flujo turbulento normal es aquel que se presenta cuando la velocidad del fluido tiene un número de Reynolds mayor de 2000 pero menor de 2500, en este estado pueden existir tanto laminar como turbulento. El flujo turbulento irregular es cuando la velocidad del fluido posee un número de Reynolds mayor a 2500.⁷

Figura 3. Flujo Turbulento.⁶



1.1.2 Fenómenos físicos que Afectan el Estado del Flujo.

a. Fenómeno de vena contraída y vena expandida.

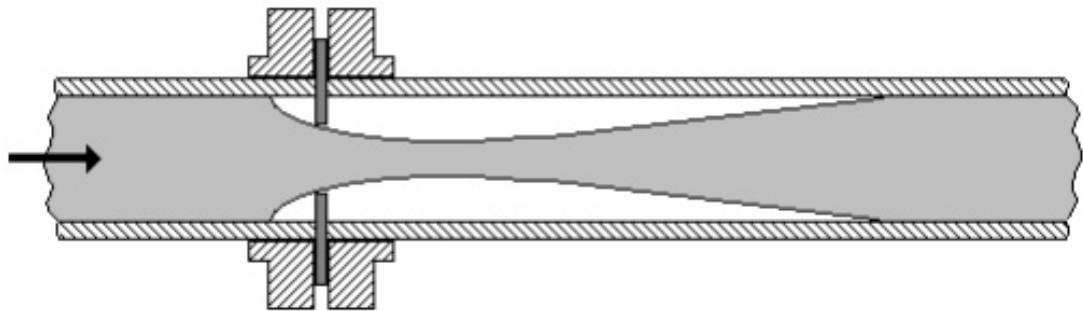
Este fenómeno ocurre cuando el fluido pasa por una restricción de la tubería de forma abrupta, esto provoca que la vena fluida presente una sección inferior a la del estrechamiento, lo que se denomina “vena contracta”. En la figura 4 se muestra la

⁷ HUGO RAMOS Y PABLO ESTRELLA, física 2, 2009 editorial Cengage Learning, 305p. [14 de Agosto de 2013]

placa de orificio que hace la obstrucción al paso del fluido y ocasiona este fenómeno. El efecto de la vena contraída no sucede cuando el estrechamiento de la sección de la tubería es de forma gradual.⁸

El fenómeno de vena expandida es el opuesto al fenómeno de vena contraída ya que sucede cuando la restricción de la tubería aumenta de forma abrupta generando que el flujo se convierta en turbulento, en la figura 4 se puede observar los dos fenómenos vena contracta y vena expandida.

Figura 4. Fenómeno de vena contraída y expandida.⁹



b. Turbulencia

Al aumentar la velocidad del agua se llega a cierto momento, en que el flujo se vuelve altamente irregular. Se observa que el agua al bordear la piedra produce remolinos. Si la velocidad del agua es mucho más alta todavía, aparecen remolinos dentro de los mismos. En estas condiciones el flujo del agua es turbulento.¹⁰

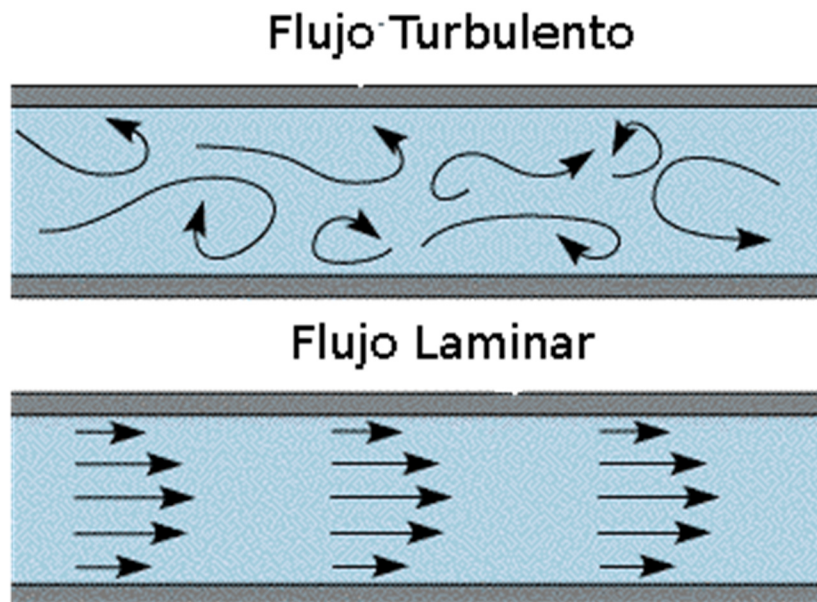
⁸ M. LOPEZ GARCIA Y M. RAMON, Medición de Caudal, 2007, 21p, Trabajo de grado [en línea], Disponible en http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf. [23 de Agosto de 2013]

⁹ Imagen tomada en: http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf [23 de Agosto de 2013].

¹⁰ LA TURBULENCIA DE LOS FLUIDOS [en línea], Disponible en http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/150/htm/sec_18.htm [16 de junio de 2013].

Un ejemplo de turbulencia ocurre cuando se calienta un recipiente de agua en una estufa. Cuando se deja calentar el agua durante un tiempo, ésta aumenta su temperatura y empieza a verse un movimiento en el agua, que recibe el nombre de convección, la causa de la convección se presenta debido a la porción de agua más cercana a la flama, la cual se calienta y por tanto su volumen aumenta. Al ocurrir esta dilatación, el líquido caliente se vuelve más ligero que el líquido más frío de la parte de arriba. Por tanto, el agua fría es más pesada y se mueve hacia abajo, desalojando a la caliente, que a su vez se mueve hacia arriba. De esta forma se genera un movimiento tipo circular de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo, como se muestra en la figura 5.¹⁰

Figura 5. Fenómeno de turbulencia en el agua.¹¹



¹¹ Imagen tomada en: <<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>> [24 de Julio de 2013].

1.2 NORMA TÉCNICA COLOMBIA NTC1063

1.2.1 Definición

La Norma Técnica Colombiana (NTC) define los parámetros necesarios para el diseño, fabricación y calibración de los medidores de agua permitidos para el territorio colombiano, de la misma manera contiene terminología que se hace preciso definir a fin de obtener un mejor entendimiento de dicho documento normativo:¹²

- **Caudal Q .** Es el cociente entre el volumen real del agua que pasa a través del medidor del agua, y el tiempo que le toma a este volumen pasar a través del medidor de agua.
- **Volumen real V_a .** Es el volumen total de agua que pasa a través del medidor de agua, independiente del tiempo que le toma.
- **Volumen indicado V_i .** Es el volumen de agua indicado por el medidor.
- **Error máximo permisible **EMP**.** Los valores extremos del error relativo de la indicación del medidor de agua, permitidos en esta norma.
- **Condiciones de operación nominales **CON**.** Es la situación de uso que dan el rango de valores de los factores de influencia, para los cuales se requiere que los errores de indicación del medidor estén dentro del EMP.

¹² NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS NTC1063. Medición del flujo de agua en conductos cerrados a sección llena, 3^a actualización editada 2007-06-20. [16 de Abril de 2013]

- **Caudal permanente Q_3 .** Es el mayor caudal dentro de las CON al cual se requiere que el medidor de agua opere de manera satisfactoria dentro del error máximo permisible.
- **Caudal de sobrecarga Q_4 .** Es el máximo caudal al cual el medidor de agua debe operar durante un periodo de tiempo corto dentro de su EMP, mientras mantiene su desempeño metrológico cuando opera posteriormente dentro de sus CON.
- **Caudal mínimo Q_1 .** Es el menor caudal al cual se requiere que el medidor de agua opere dentro del EMP.
- **Caudal de transición Q_2 .** Es el caudal que ocurre entre el caudal permanente, Q_3 , y el caudal mínimo, Q_1 , que divide el rango de caudal en dos zonas, la “zona superior” y la “zona inferior”, cada una caracterizada por su propio EMP.
- **Temperatura de trabajo mínima admisible T_{tMA} .** Es la temperatura mínima que puede soportar un medidor de agua permanente a una presión interna dada, sin deterioro de su desempeño metrológico.
- **Temperatura de trabajo máxima admisible T_{tMA} .** Es la temperatura máxima que puede soportar un medidor de agua permanente a una presión interna dada, sin deterioro de su empeño metrológico.
- **Presión de trabajo mínima admisible P_{tMA} .** Es la presión mínima que un medidor de agua puede soportar en forma permanente dentro de las CON, sin deterioro de su desempeño metrológico.
- **Presión de trabajo máxima admisible P_{tMA} .** Es la presión máxima que un medidor de agua puede soportar en forma permanente dentro de las CON, sin deterioro de su desempeño metrológico.

- **Presión de trabajo P_t .** Es la presión promedio del agua en la tubería, medidas aguas arriba y aguas abajo del medidor de agua.
- **Perdida de presión Δp .** Es la pérdida de presión a un caudal dado, causada por la presencia del medidor en la tubería.
- **Medidor en línea.** Tipo de medidor de agua colocado directamente en un conducto cerrado por medio de las conexiones (roscadas o bridadas) suministradas.
- **Sensor de flujo.** Hace parte del medidor de agua (tal como el disco, el pisto, el volante, el elemento de la tubería o la bobina electromagnética), que registra el caudal o el volumen de agua que pasa a través del medidor.
- **Transductor de medida.** Parte del medidor que transforma el flujo o el volumen de agua que se va a medir, en señales que se pasan a la calculadora.
- **Calculadora.** Es la parte del medidor que recibe las señales de salida del transductor y posiblemente de los instrumentos de medición asociados, y los transforma en resultados de la medición, y si es apropiado, almacena los resultados en la memoria hasta que se utilicen.
- **Dispositivo indicador.** Es la parte del medidor que visualiza los resultados de la medición, ya sea en forma continua o a solicitud.
- **Dispositivo de suministro de energía.** Dispositivo que entrega a los equipos electrónicos la energía eléctrica requerida, usando una o varias fuentes de c.a. o c.c.

- **Falla.** Diferencia entre el error de indicación y el error intrínseco de un medidor de agua.
- **Equipo bajo ensayo EBE.** Medidor de agua completo, sub-ensambles de un medidor de agua o dispositivo auxiliar.
- **Caudal de ensayo.** Caudal promedio durante un ensayo, calculado de las indicaciones de un dispositivo de referencia calibrado, igual al cociente del volumen real que pasa a través del medidor de agua, dividido por el tiempo que le toma a ese volumen pasar a través del medidor de agua.
- **Diámetro nominal.** Designación alfanumérica, de tamaño para componentes de un sistema de tubería, que se utiliza para propósitos de referencia.

1.2.2 Requisitos de Instalación.

- Para garantizar una buena operación y una longevidad del instrumento, la tubería debe estar lleno siempre de agua.
- El medidor debe estar protegido contra golpes o vibraciones y si es necesario el medidor ha de ser instalado sobre una base o soporte.
- El instrumento debe ser privado de daños por temperaturas extremas del agua o ambientales.
- Si hay la posibilidad que entre aire al medidor o grupo de medidores de agua, se debe incorporar o instalar una válvula de liberación de aire aguas arriba y/o aguas abajo de acuerdo con el manual del fabricante.
- La orientación del medidor debe ser acorde con su clase.
- Se debe proteger el instrumento a posibles daños ocasionados por la corrosión ambiental externa.

- No se debe utilizar el medidor y sus accesorios como puesta a tierra de otros elementos diferentes de su propio sistema, con el fin de minimizar el riesgo para el personal operativo, para cumplir este objetivo debe haber una derivación permanente para el medidor y sus accesorios asociados.
- Deben tomarse precauciones para evitar daños en el instrumento causados por condiciones hidráulicas desfavorables tales como: cavitación, pulsación y golpe de ariete.

Las condiciones de la instalación y ambientales deben cumplirse para que el medidor de agua permanezca bajo sus condiciones de operación nominal. Otras condiciones deben ser contempladas tales como: temperatura del agua, humedad relativa, presión del agua, calidad del agua, descargas electrostáticas, campos magnéticos continuos, perturbaciones electromagnéticas y cualquier otra condición mecánica, química, climática, eléctrica o hidráulica que no sea conveniente.¹²

1.2.3 Ensayo para Determinar los errores de Indicación.

El método que se describe en esta norma para los errores de indicación, es el denominado método de “recolección”, en el cual la cantidad de agua que pasa a través del medidor es recolectada en un recipiente y luego se determina su cantidad calculando su volumen o su masa. Se puede emplear métodos diferentes siempre y cuando se respete el nivel de exactitud establecido en este documento.¹²

a. Descripción del Banco de Ensayo.

El banco de ensayo consta de los siguientes ítems:¹²

- Un suministro de agua.
- Tubería.
- Dispositivo de referencia calibrado
- Instrumentos para medir el tiempo de ensayo.

- Dispositivos para automatizar el ensayo.
- Instrumento para medir la temperatura del agua de ensayo.
- Instrumento para medir la presión de agua.

b. Tubería.

La tubería debe incluir los siguientes instrumentos: ¹²

- Un tramo de ensayo en la que están posicionados los medidores.
- Instrumentos para establecer el caudal deseado.
- Uno o dos dispositivos de separación.
- Instrumentos para determinar el caudal.
- Uno o más purgas de aire.
- Un dispositivo de no retorno.
- Un separador de aire.
- Un filtro.
- Medios para verificar que la tubería se llene a un nivel de referencia antes y después del ensayo.

c. Sección de Ensayo.

La sección de ensayo incluye lo siguiente.¹²

- Una o más derivaciones para la medición de presión, una derivación situada aguas arribas y cerca del primer medidor.
- Medios para medir la temperatura del agua a la entrada del primer medidor.

Se debe tener en cuenta que los dispositivos o elementos de la tubería colocadas en la sección de medición, no deben causar cavitación o perturbaciones en el flujo capaces de alterar el desempeño de los medidores o causar errores de medición.¹²

2. REINGENIERÍA DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.

La fase 1 del banco de flujo de realizó el diseño preliminar, la selección del variador de velocidad y el sensor para la medición de flujo. La fase 2 involucró la reingeniería detallada del banco de ensayos y calibración adaptada a las condiciones físicas del laboratorio de instrumentación, implementación del primer anillo básico de flujo y la puesta en marcha de los equipos seleccionados en la fase 1. La reingeniería en la fase 3 se enfocó principalmente en los tanques para la calibración, con base a los estatutos impuestos en la NTC1063 en la etapa de calibración del banco y en las recomendaciones del ingeniero del laboratorio de metrología del acueducto metropolitano de Bucaramanga. Para la implementación del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua se utilizaron los instrumentos adquiridos en la fase 1 y 2 como el variador de frecuencia, el sensor de flujo, el tanque cisterna, frame mecánico y los demás dispositivos adquiridos en esta fase del proyecto.

2.1 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 1

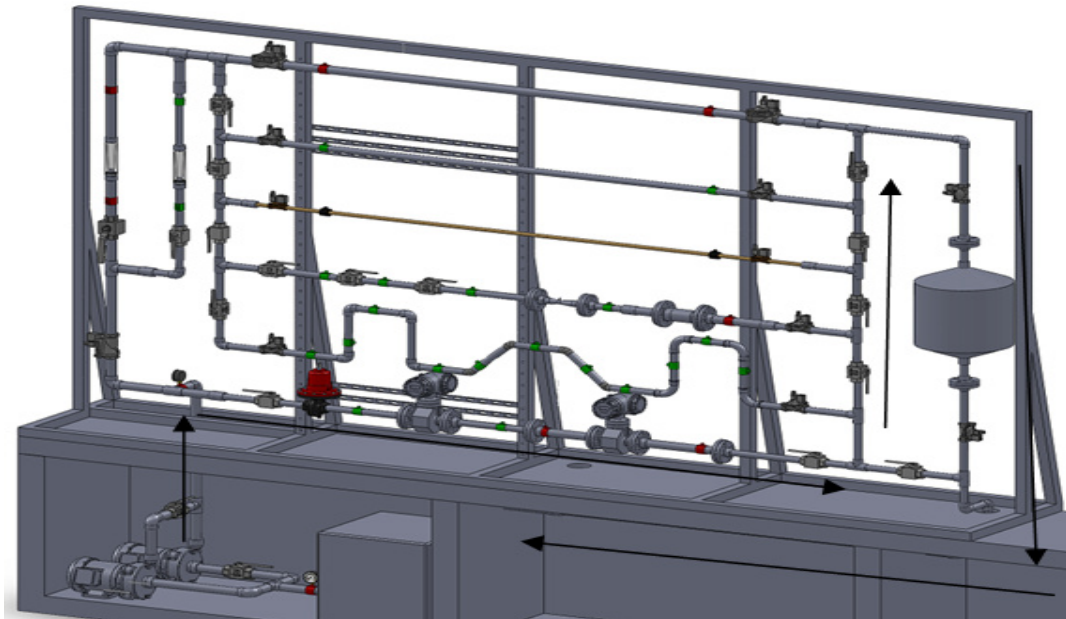
La fase 1 fue realizada con el objetivo de desarrollar un banco de flujo capaz de cumplir con los requerimientos necesarios para la realización de pruebas de calibración y pérdidas de presión. El diseño final de la fase inicial se dividió en dos etapas.¹³

¹³ LATORRE, ANDRES RICARDO, Diseño de un banco de ensayo para la medición de flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombiana NTC1063, Libro Tesis, 188p. [25 de Agosto de 2013]

2.1.1 Etapa de Calibración de Equipos

En esta primera etapa se realizó el anillo de calibración de equipos para la medición de flujo. Su diseño incorporó dos métodos de calibración, los cuales fueron referenciados de la Norma Técnica Colombiana 1063. El primero es usando un dispositivo de referencia calibrado, el cual busca realizar la comparación de los equipos a calibrar con el de referencia, y así determinar el error de indicación. El segundo método consta de un patrón de referencia con volumen conocido, con el cual se realiza la comparación de la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo por los dispositivos a calibrar, de esta manera se puede determinar el error de medición de los dispositivos a calibrar. En la figura 6 se muestra el diseño del anillo de calibración.¹³

Figura 6. Banco de Flujo Fase 1, Etapa de calibración.¹⁴



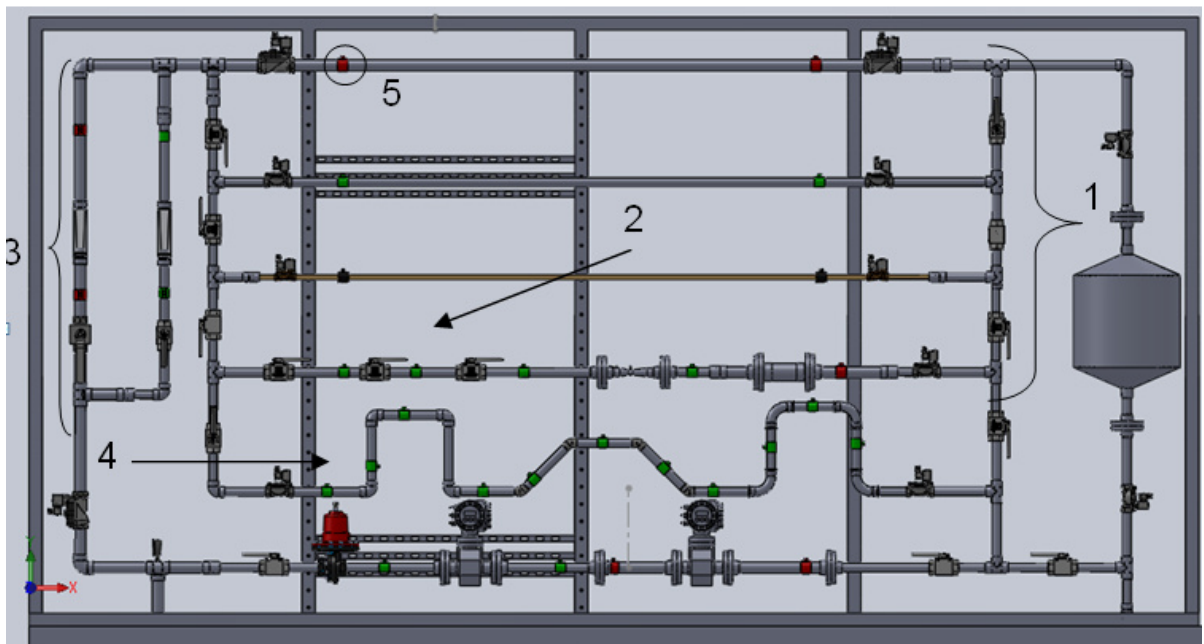
¹⁴ Imagen tomada en: LATORRE, ANDRES RICARDO, Diseño de un banco de ensayo para la medición de flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombiana NTC1063, Libro Tesis, 188p. [25 de Agosto de 2013]

2.1.2 Etapa de Pérdidas de Presión.

En esta etapa se tiene como objetivo principal realizar ensayos de pérdidas de presión, el cual está contenido en varios tramos de tuberías. Las pérdidas de presión se deben a factores que influyen como: diferentes diámetros de tubería, diferentes tipos de válvulas, tramos con diferentes codos y ángulos y por diferentes dispositivos de medición de flujo.³³

En la figura 7 se muestra las diferentes secciones realizadas en el diseño de la fase 1, la cual incorpora diferentes elementos que conforman la etapa de pérdida de presión.

Figura 7. Banco de flujo Fase 1, Etapa de pérdidas de presión.¹⁵



¹⁵ Imagen tomada en: LATORRE, ANDRES RICARDO, Diseño de un banco de ensayo para la medición de flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombiana NTC1063, Libro Tesis, 188p. [27 de Agosto de 2013]

Estas pérdidas de presión pueden ser:

1. Pérdidas por circulación.
2. Diferentes clases de válvulas.
3. Rotámetros de diferente tamaño.
4. Tramos con diferentes codos y ángulos.
5. Cámaras anulares para las mediciones de presión en diferentes puntos.³³

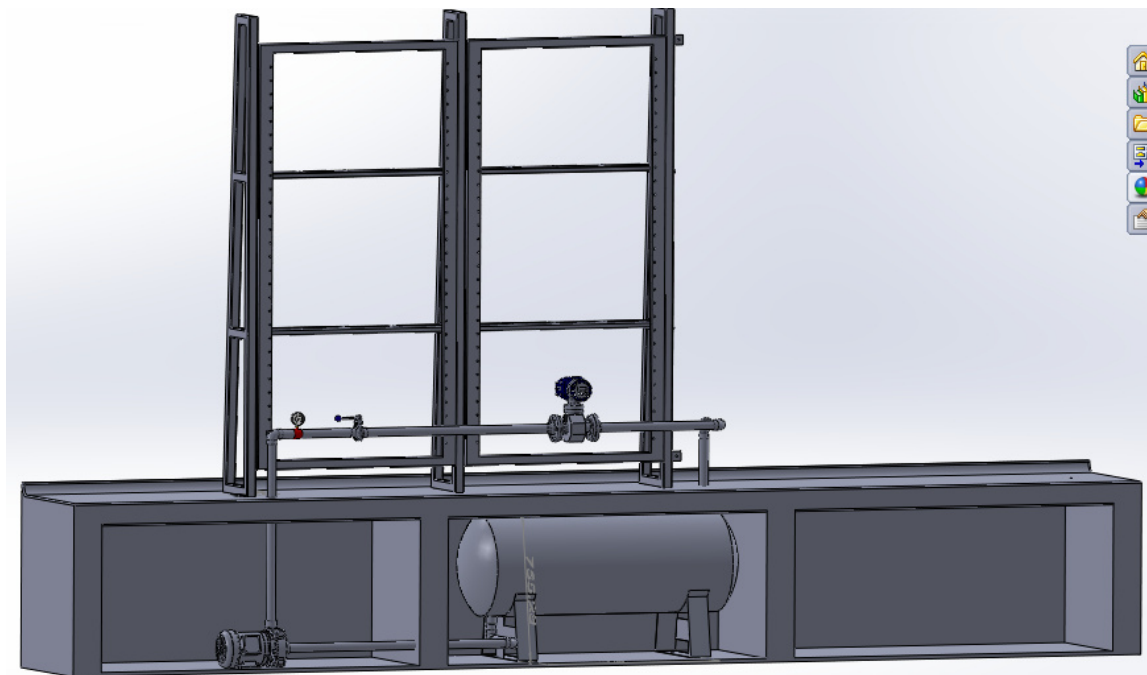
2.2 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 2.

2.2.1 Depuración del Banco de Flujo Fase 1.

En el desarrollo de la segunda fase del proyecto del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua para el laboratorio de instrumentación, fue primordial evaluar, como primera instancia, el diseño de la fase 1 para determinar los puntos clave para la implementación de la fase 2, ya que, en esta etapa se realizó el montaje físico de un tramo del frame mecánico, tubería, tanque de almacenamiento, dispositivos y accesorios. Igualmente en la depuración del diseño se tuvieron en cuenta factores como, la flexibilidad en el manejo de tubería, la resistencia del frame mecánico, la capacidad del tanque de almacenamiento, los accesorios adecuados, medidas longitudinales según la NTC 1063, y lo más fundamental es tener en cuenta los dispositivos que requiere el anillo de calibración para que cumpla con los estatutos de la NTC 1063. En la figura 8 se muestra el diseño del montaje físico de la fase 2 del banco de flujo.¹⁶

¹⁶ CACERES, HERNAN M., RUEDA FABIO A., Depuración de la ingeniería detallada e implementación básica del banco de ensayo para la medición del flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombia NTC 1063, Libro Tesis. [22 de Julio de 2013].

Figura 8. Banco de ensayo y calibración Fase 2.¹⁷



Uno de los factores que influyo en la depuración del diseño de la fase 1 es el acoplamiento real del banco de flujo respecto al espacio real del laboratorio y componentes que puedan afectar al mismo, tales como: luminarias, tubería de aire presurizado, sistema de aire acondicionado, estructura de la base del frame y ubicación del tablero de control. En la figura 9 se muestra la fase 2 del banco de flujo en el ambiente real.

¹⁷ Imagen tomada en: CACERES, HERNAN M., RUEDA FABIO A., Depuración de la ingeniería detallada e implementación básica del banco de ensayo para la medición del flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombia NTC 1063, Libro Tesis, 18p. [22 de Julio de 2013].

Figura 9. Banco de ensayos y calibración Fase 2 espacio real. ¹⁸



Los cambios realizados en la fase 2 con respecto al diseño de la fase 1 fueron:

- Frame mecánico.
- Tanque de almacenamiento.
- Bomba centrífuga.
- Acondicionamiento del banco.
- Ubicación del tablero de control.

¹⁸ Imagen tomada en: CACERES, HERNAN M., RUEDA FABIO A., Depuración de la ingeniería detallada e implementación básica del banco de ensayo para la medición del flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombia NTC 1063, Libro Tesis. [22 de Julio de 2013].

2.2.2 Acondicionamiento del Laboratorio para Cumplir los Requerimientos Básicos.

El buen uso y el correcto aprovechamiento del espacio físico del laboratorio dieron como resultado excelentes condiciones de trabajo, con el objetivo de brindar un mejor espacio de trabajo en el laboratorio, capaz de satisfacer los estatutos impuestos por la NTC1063 y brindar la comodidad para el trabajo de los estudiantes y docentes involucrados.

La humedad y la temperatura son condiciones externas que afectan las mediciones creando una incertidumbre en la medida. El acondicionamiento del laboratorio implica involucrar estos factores afectantes, por lo anterior fue necesario posicionar un sensor de humedad y temperatura en el laboratorio con el propósito de reducir el grado de incertidumbre en las mediciones tomadas de los instrumentos.

2.3 DISEÑO DEL BANCO DE FLUJO DE LA FASE 3.

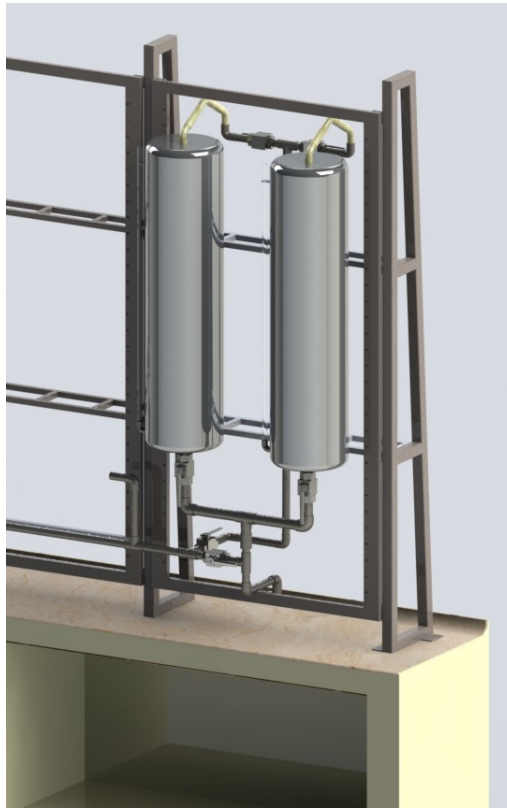
En la reingeniería de la fase 3 del banco de ensayos y calibración se tuvo que tener en cuenta al detalle lo desarrollado en las fases 1 y 2 puesto que en cada una de ellas se determinaron parámetros muy importantes como accesorios permitidos, especificaciones de materiales, entre otros, todo esto con base en la Norma Técnica Colombiana NTC1063 con el fin de lograr el correcto funcionamiento del banco como método de calibración.

2.3.1 Depuración del Banco de la Fase 2

Para la implementación de la fase 3 del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua para el laboratorio de instrumentación se rediseño la estructura geométrica de los tanques de calibración; de manera que se adecuara a

las características físicas del laboratorio, así como también de seguridad, por lo que se diseñaron dos tanques de una capacidad aproximada de 240 litros; esto con el fin de minimizar el riesgo de accidentes por fallas en el frame mecánico puesto que las fuerzas se distribuyeron mejor al dividir el volumen del tanque en dos tanques como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Tanques de calibración Fase 3.

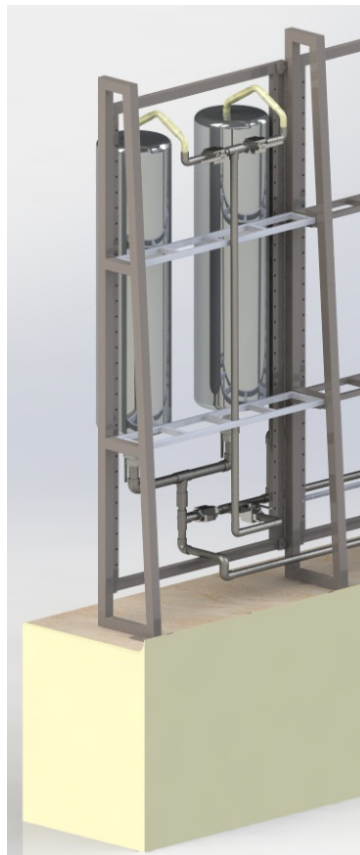


Con este diseño también se logró la flexibilidad para las pruebas de calibración puesto que si se desean realizar pruebas con caudales pequeños solo es necesario usar un tanque y para pruebas de caudal de sobrecarga se usan los dos tanques, distribuyendo el volumen de la prueba, de esta manera el proceso es más visible para los estudiantes de posgrado y hace más fácil la detección de errores.

Otra área que se rediseño con respecto a la fase 2 fue la alimentación de los tanques de calibración, puesto que al ser modificado, la geometría y distribución en el frame

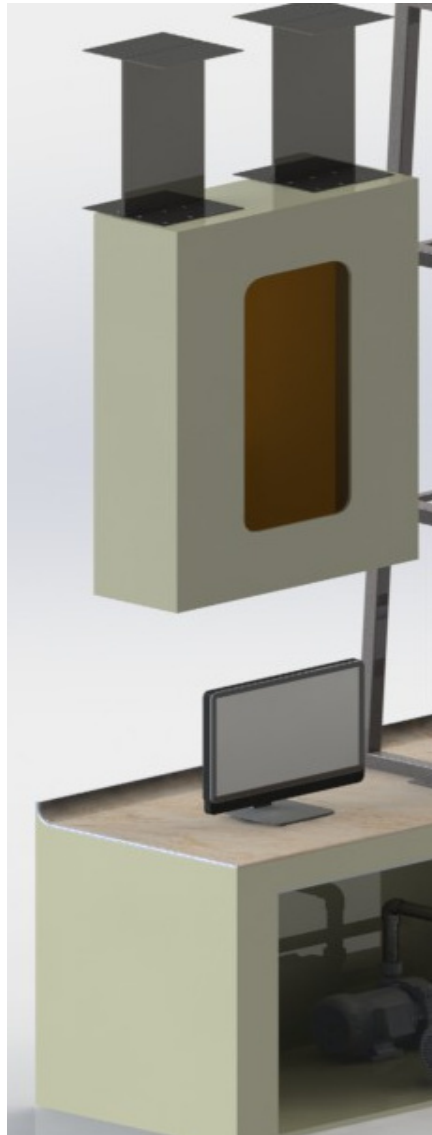
también se tuvo que modificar dicha sección, de manera tal, que se logrará optimizar al máximo el espacio y que permitiera la selección manual entre la parametrización del instrumento de medición y las pruebas de calibración por medio de un juego de válvulas tipo mariposa, esta modificación se puede observar en la figura 11. No obstante se modificó la entrada de dicha alimentación hacia los tanques según asesoría de los metrólogos del laboratorio de calibración del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), cambiando de una entrada recta a una entrada en ángulo formando un cuello de cisne lo que permite observar y controlar mejor los niveles del agua en la tubería antes y después de la prueba; tal y como lo precisa la norma NTC 1063.

Figura 11. Alimentación tanques de calibración.



Finalmente, según las recomendaciones de la fase 2 y en el espacio físico del laboratorio se procedió a determinar el lugar adecuado para el gabinete eléctrico, de tal manera, que permitiera el acceso al mismo y al computador, por lo que se optó por anclar el tablero al techo del laboratorio por medio de un par de vigas metálicas de 4mm de espesor; reforzando este soporte con 6 anclas que se colocaron en la viga divisoria de las ventanas, esto permitió colocar el computador sobre el mesón debajo del tablero eléctrico como se puede observar en la figura 12.

Figura 12. Tablero de control.



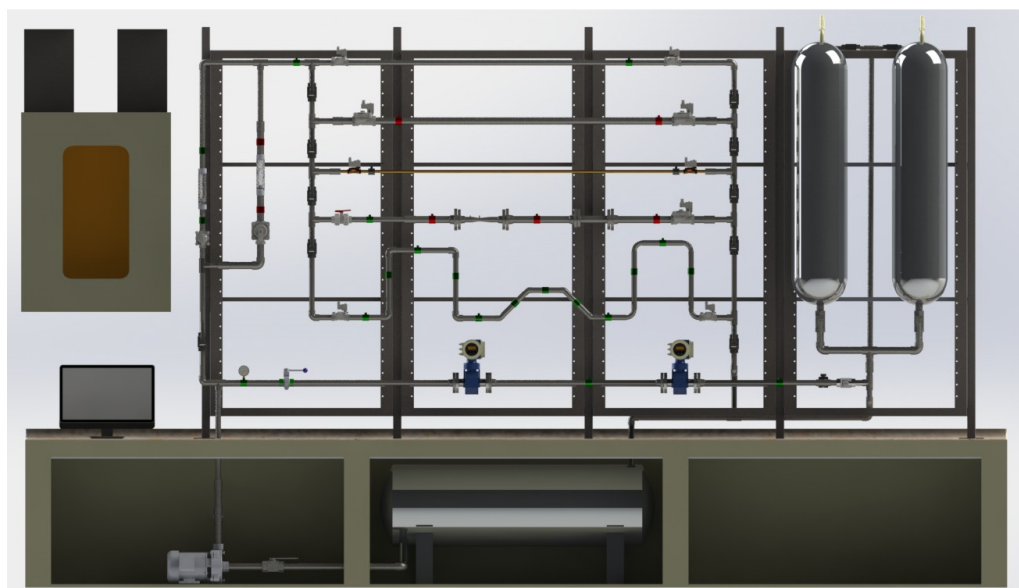
2.4 PROYECCIÓN FINAL DEL BANCO PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO.

Para el banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua se proyecta implementar una serie de componentes adicionales que permitan no solo la calibración de medidores de flujo de agua; sino también medir pérdidas de presión por los diferentes componentes que pueden encontrar, este sistema de pérdidas de presión se está tomando del diseño realizado en la fase 1 con algunas adaptaciones para el ajuste al nuevo frame mecánico que se implementó desde la fase 2.

2.4.1 Diseño Final para la Medición de Flujo y Pérdidas.

La proyección final del banco de trabajo fue basada en la Norma Técnica Colombiana 1063 para la etapa de metrología. El diseño final tuvo una serie de cambios en cuanto a mejoras de la fase 1 y la fase 2. En la figura 13 se muestra el diseño final con las mejoras realizadas a la etapa de calibración y la de pérdidas de presión.

Figura 13. Proyección final del banco de Ensayos y calibración.



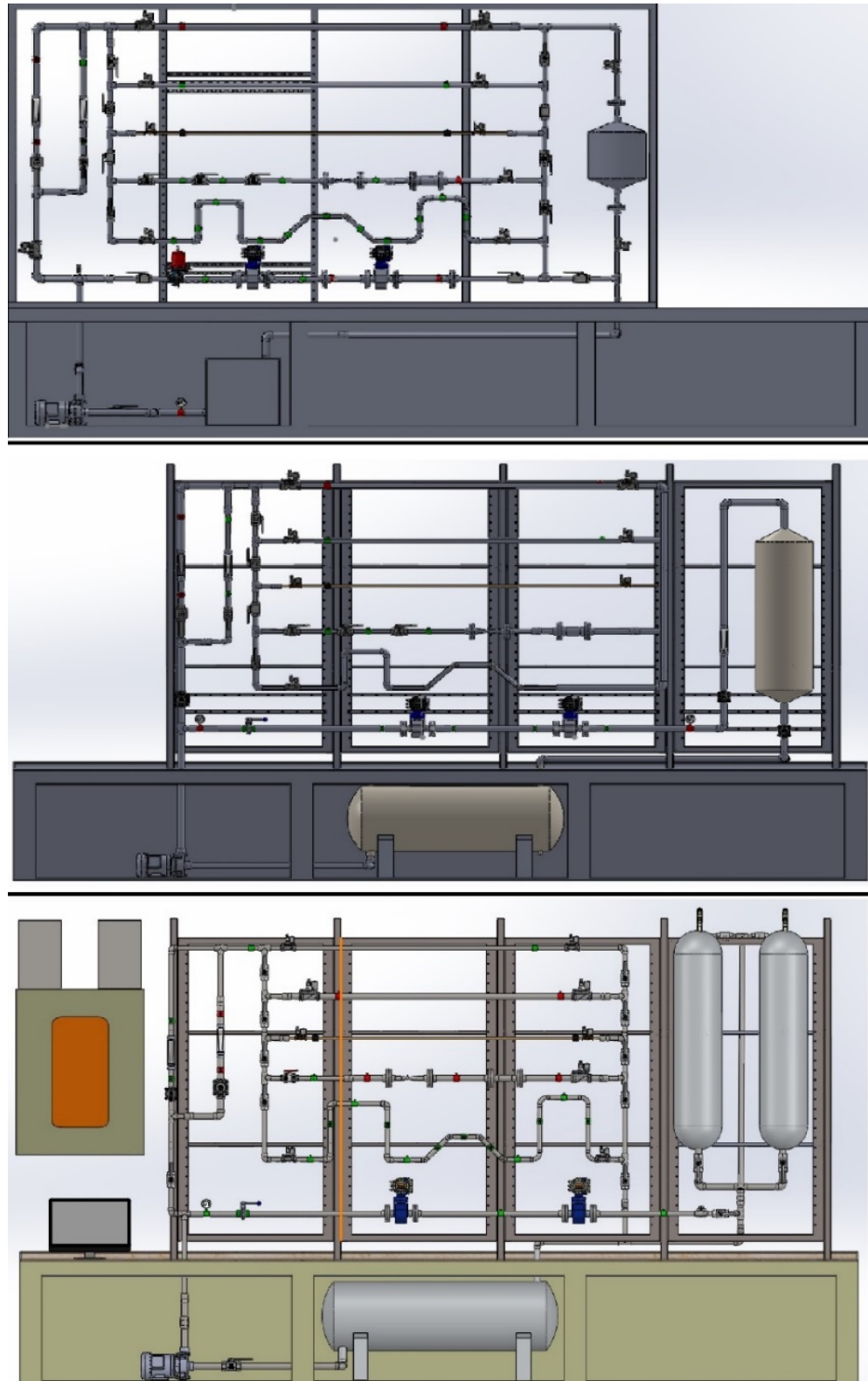
En la tabla 1 se observan las adiciones y mejoras en cuanto a diseño, basándose en el espacio real de trabajo en el laboratorio de manera que cumpla los requerimientos necesarios para un laboratorio de metrología.

EQUIPOS	MEJORAS
Manómetros	Sistema HMI
Válvulas	Control de los variadores
Tubería diferentes pulgadas	Protecciones eléctricas
Guarda motores	Módulo de temperatura
Accesorios para la tubería	Tanque de abastecimiento

Tabla 1. Proyección del banco de ensayos y calibración.

En la figura 14, se observa el diseño de la fase 1(arriba) y la fase 2(mitad) y la depuración de las mismas (fase 3, abajo). Así mismo se muestran los cambios realizados para las mejoras en cuanto a la operación del módulo y acondicionamiento del espacio de trabajo, el rediseño de los tanques de calibración, el rediseño de la sección de las bombas y la ubicación de los elementos que conforman el banco de trabajo para el laboratorio de instrumentación.

Figura 14. Depuración del banco de ensayos y calibración.



3. IMPLEMENTACIÓN DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA Y SU ADECUACIÓN A LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO.

El banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua ha sido diseñado con base a la norma NTC 1063, la cual determina una serie de accesorios. Para el cumplimiento de dicha norma, el banco cuenta principalmente con: El tanque de almacenamiento, las bombas, los variadores de velocidad, el sistema de adquisición de datos y control, las válvulas mariposa, las válvulas solenoides, los sensores capacitivos, los tanques de calibración y el sensor para la medición de flujo. A continuación se describe cada dispositivo del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua y su implementación, al igual que los caudales para realizar pruebas de volumetría según la norma técnica colombiana NTC 1063, un diagrama de proceso o P&ID y el diagrama eléctrico del banco de flujo.

3.1 ACCESORIOS DEL CIRCUITO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DEL BANCO DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.

3.1.1 Tanques Volumétricos de Calibración.

Los tanques de calibración poseen una capacidad de 120 litros cada tanque; para un volumen conjunto de 240 litros, su geometría es cilíndrica de 1350 mm de longitud y 330 mm de diámetro, las tapas superiores poseen forma de semiesferas con el mismo diámetro que el cilindro permiten lograr dicha capacidad; se fabricaron en acero inoxidable tipo 304 de 3 mm de espesor, se encuentran soportados por tres perfiles de acero inoxidable tipo 304 de 4 mm de espesor y tres bases soldadas al cuerpo de los tanques para permitir una mejor distribución de las fuerzas.

En la figura 15 se observa los tanques de calibración donde se puede apreciar que la entrada de los tanques se diseñó en la parte superior (a) la cual es controlada por válvulas solenoides (b) que permiten la elección del tanque que se desea llenar; cuentan también con una mirilla (c) que permite la visualización del agua y verificar la ausencia de burbujas de aire en el sistema; la salida para el desagüe de los tanques se encuentra en la parte inferior (d) controlada por dos válvulas solenoides (e), cada tanque cuenta con una mirilla la cual permite monitorear el nivel de cada tanque de tal forma que indique el inicio y el fin de la prueba de calibración.

Figura 15. Tanques de Calibración.



3.1.2 Bomba Centrífuga.

La bomba es utilizada para impulsar el líquido (agua) a través de toda la tubería para realizar los ensayos o las pruebas de calibración de flujo. La bomba que se adicionó al sistema es de marca, *BARNES* (a) referencia, *1515HHE-23*, está compuesta por dos partes, un motor eléctrico marca SIEMENS y una bomba centrífuga con impulsor tipo caracol. El motor eléctrico es un motor de inducción trifásico a 60Hz, de 2HP y 3440 rpm, este motor puede conectarse en conexión triángulo-triángulo, estrella-estrella o triángulo, dependiendo del voltaje entre fases, estrella-estrella (380 Vac entre fases), triángulo-triángulo (220 Vac entre fases) y triángulo (440 Vac entre fases), ya que el laboratorio posee una alimentación de 220 Vac la bomba se conectó con la topología triángulo-triángulo. La bomba es de tipo centrífuga de acero inoxidable, de 1"1/2 de diámetro en la succión y entrega. La bomba está diseñada para entregar un caudal de 250L/min a una altura de 20 metros. En la figura 16, se observa la bomba instalada en el primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua.¹⁹

Figura 16. Bomba centrífuga de 2 HP.



¹⁹ BARNES, 1515HHE-23, Bomba centrífuga con rodete cerrado del alta presión. [29 de Agosto 2013].

3.1.3 Variador de Velocidad.

El variador es utilizado para modificar la velocidad del motor a través la variación de frecuencia, y así poder obtener diferentes caudales en el primer anillo de calibración de flujo; como es necesario inducir caudales aún mayores en esta fase se implementó una segunda bomba descrita en el ítem anterior; y también un segundo variador que permita el control de la misma de manera independiente.

El variador es de marca *Danfoss*, referencia *VLT Micro Drive FC 51*, tiene una capacidad de 2HP/1,5KW, posee una entrada trifásica de 200-240VAC, 60Hz, consume 6,8 A. El variador de velocidad posee una LCP (panel de control local), por medio del cual se controla el motor, se energiza y se programa el variador, este panel de control local, posee unas teclas de navegación, encendido, apagado y un display en el cual se visualiza los cambios y el progreso de funcionamiento.²⁰ En la figura 17 se puede visualizar el variador de velocidad.

Figura 17. Variador de velocidad.



²⁰ DANFOSS, Manual de funcionamiento Convertidor de frecuencia VLT MICRO FC 51. [02 de Septiembre de 2013].

3.1.4 Válvulas Solenoides.

Las válvulas solenoides son usadas para el control del llenado y vaciado de los tanques de manera automática desde el HMI por lo que fue necesario instalar cuatro válvulas; permitiendo de esta manera un control más rápido y eficiente sobre el banco de flujo.

Las válvulas son marca *KTS*, referencia *ZCT2125NSP*, posee cuerpo en acero inoxidable de una pulgada de diámetro, la alimentación del actuador es 110 Vac monofásica controlado por un relé y su estado es normalmente cerrado. En la figura 18 se puede observar la válvula implementada en el banco de flujo.

Figura 18. Válvula solenoide KTS.



3.1.5 Sensores Capacitivos.

Los sensores capacitivos se instalaron con el fin de automatizar de forma más confiable y rápida el proceso de calibración, estos sensores se colocan en un costado de los tubos de vidrio que indican el nivel del tanque, son soportados por unas bases blancas como se observa en la figura 19. Se implementaron 4 sensores, 2 por cada tanque permitiendo así dar el inicio y el fin de la prueba.

Figura 19. Soporte sensor capacitivo.



Los sensores son marca AUTONICS, referencia CR18-8DP, el cuerpo es de material plástico, su geometría es cilíndrica con rosca por todo el cilindro; lo que permite el ajuste a diferentes distancias. El sensor se observa en la figura 20, el cuerpo del sensor es de 18mm de diámetro y 55 mm de largo, el rango máximo de medición es de 8mm ajustables. Este tipo de sensor es usado en la industria debido a su topología resistente a diferentes tipos de ambientes.

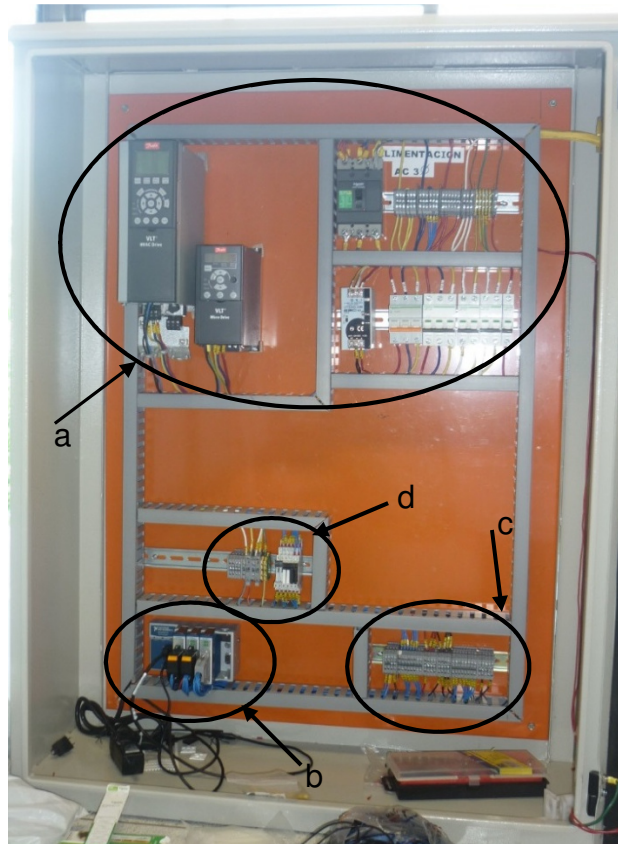
Figura 20. Sensor capacitivo AUTONICS.



3.2 MONTAJE DEL GABINETE ELECTRICO

El gabinete eléctrico para el banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua se implementó basado en las normas nacionales como la RETIE, NTC2050 de tal manera que se lograran niveles de protección lo suficientemente redundantes; que protegieran a los equipos y a los operarios. El gabinete eléctrico posee unas medidas de 120x90x30 cm, espacio en el cual se desarrolló una distribución acorde a la norma, obteniendo como resultado de dicha distribución: en la parte superior se colocó todos los equipos concernientes a potencia (a), en la parte inferior izquierda se colocó la sección de control (b), en la sección inferior derecha se encuentran las borneras de control (c), en la sección media del gabinete se colocó lo concerniente al acondicionamiento de señal (d) como borneras y relés. Esta distribución se puede observar en la figura 21.

Figura 21. Gabinete eléctrico y de control.



En la sección (a) se tiene los siguientes equipos:

- Variador de velocidad DANFOSS VLT HVAC Drive FC 102.
- Variador de velocidad DANFOSS VLT Micro Drive FC 51.
- Totalizador trifásico SCHNEIDER.
- Breakers trifásicos, bifásicos y monofásicos SCHNEIDER.
- Fuente regulada de 24 Vdc a 4.2 A EBCHQ.
- Borneras para cada línea, neutro y tierra.

La sección (b) se encuentran los siguientes equipos:

- Sistema de adquisición de datos CompactDAQ.
- Conexión USB para comunicación PC compactDAQ.

La sección (c) posee los siguientes elementos:

- Borneras para las señales de control.

La sección (d) tiene los siguientes elementos:

- Borneras de alimentación sensor de flujo E&H.
- Borneras de alimentación sistema de adquisición de datos.
- Relés de estado sólido o SSR ALLAN BRADLEY.

3.3 MONTAJE DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE FLUJO.

Los instrumentos del primer anillo de calibración se instalan de acuerdo al concepto de flexibilidad del laboratorio y teniendo en cuenta las especificaciones de los fabricantes de cada dispositivo.

El montaje del primer anillo de calibración para medidores de flujo de agua se implementó siguiendo la siguiente lógica: primero se instalan dos frame mecánicos, de manera tal, que permita la correcta adecuación de la tubería y los tanques; para lo cual, se tuvieron en cuenta los otros dos frame instalados anteriormente en el laboratorio, los frame se anclan al techo y al mesón para reducir vibraciones y distribuir cargas. Una vez se instalaron los frame, se sigue con la instalación de los tanques de calibración, los cuales, se soportan en tres perfiles que distribuyen las cargas sobre la estructura; y se alinean, de forma tal, que queden paralelos. En la figura 22, se puede observar la implementación de los tanques de calibración, la bomba adicional y los dos módulos adicionales del frame mecánico.

Figura 22. Instalación del Frame, bombas y Tanques.

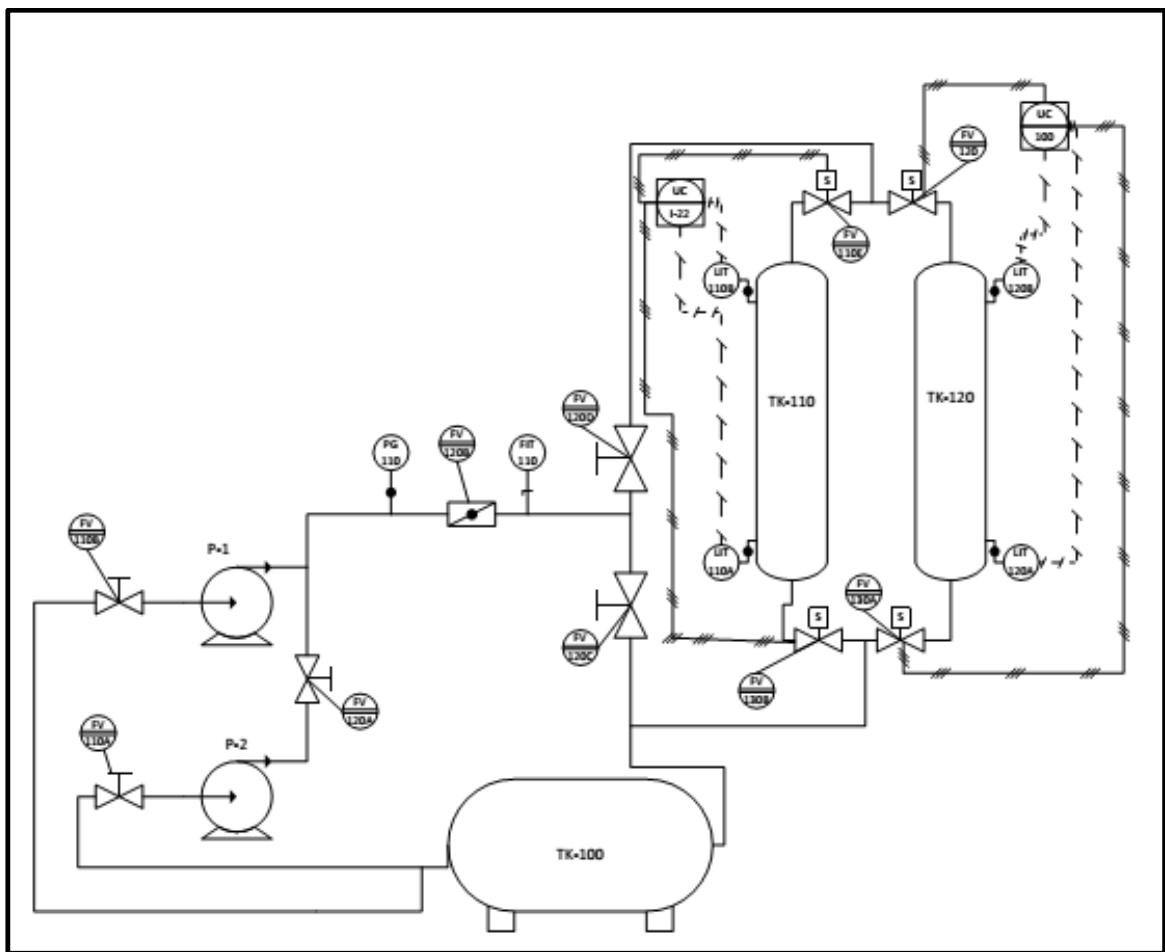


Después de haber instalado los anteriores elementos, se instala los perfiles en el frame mecánico, los cuales soportaran los diferentes dispositivos del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua, estos son: manómetro, válvulas mariposa y el sensor de flujo. Una vez instaladas las rejillas y ubicados los elementos, se instala la tubería de acero inoxidable 304, que posee conexiones tipo abrazadera, que facilitan el montaje y desmontaje de la misma en cualquier momento con el fin de conservar los estándares de flexibilidad previstos en la fase 1 y 2.

3.4 DIAGRAMA ELÉCTRICO Y P&ID DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN.

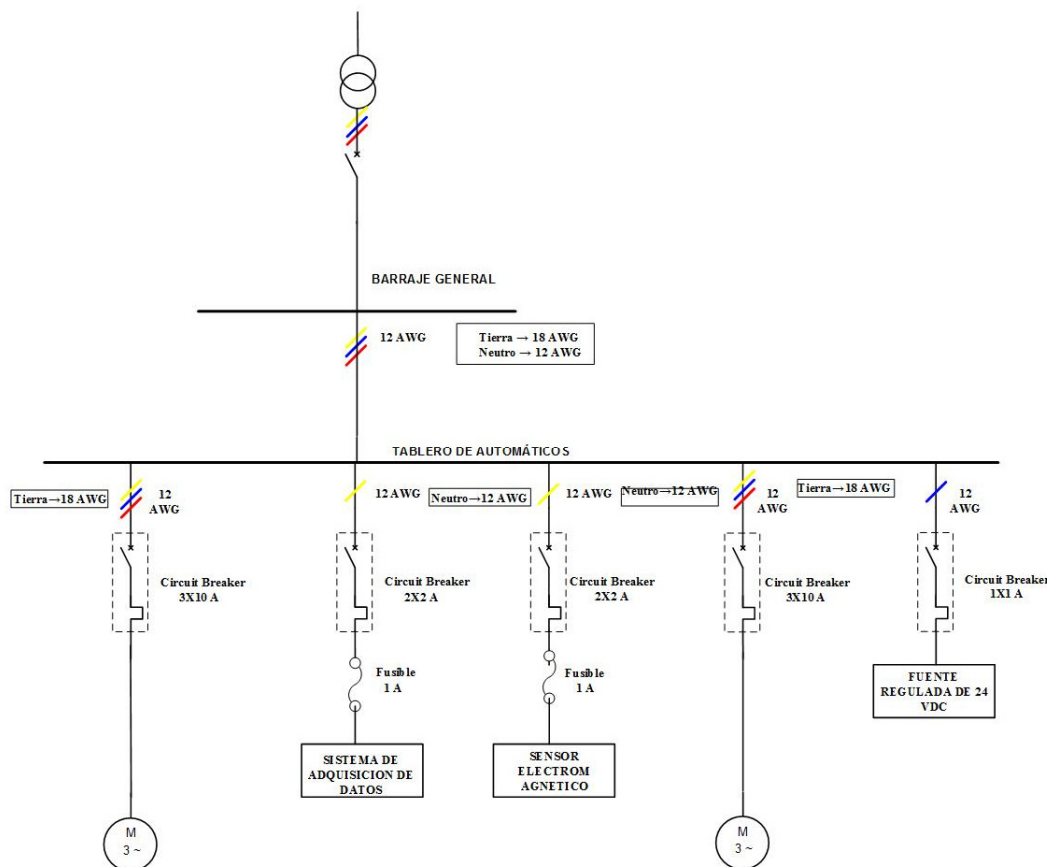
A continuación se puede observar en la figura 23 el P&ID del primer anillo de calibración del banco de medidores de flujo de agua, el cual está hecho según la norma **ANSI/ISA-5.1-1984 (R2009)**.

Figura 23. P&ID del banco de flujo.



En la figura 24, se observa el diagrama eléctrico, donde se observa las conexiones del tablero de control del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua.

Figura 24. Diagrama eléctrico del tablero de control.



3.5 CAUDALES DE PRUEBA PARA EL BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA BASADO EN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1063.

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 1063, se debe tener en cuenta para la calibración de medidores de flujo de agua cuatro caudales como mínimo para que la prueba sea válida, en los cuales se expone al instrumento a calibrar para la comprobación del estado metrológico del mismo. Los cálculos a realizar son tomados del capítulo 5 del tomo 1 de la norma, donde se explica los requisitos metrológicos y se designan los caudales de transición y de sobrecarga.¹²

3.5.1 Pruebas de Calibración Usando los Tanques Volumétricos.

El caudal mínimo se determina de acuerdo a la capacidad mínima de entrega de las bombas, el cual es 20 L/min, como se ve en la ecuación 1. Despejando la fórmula de la ecuación 2, se obtiene el caudal de transición; el cual se puede ver en la ecuación 3. El caudal máximo se determina de acuerdo a los parámetros del primer anillo de calibración y de la capacidad media que circula por el sistema, el cual es 88L/min, el cual se observa en la ecuación 4. Por último despejando la formula hallada en la ecuación 5, se determina el caudal de sobrecarga, el cual se ve en la ecuación 6. En la tabla 2, se ve los caudales de referencia para el banco de ensayos y calibración los cuales cumplen los requisitos metrológicos exigidos por la norma NTC 1063.

Q₁=caudal mínimo

Q₂=caudal transición

Q₃=caudal máximo

Q₄=caudal sobrecarga

$$Q_1 = 20 \text{ (L/min)} \quad (1)$$

Q₂ se despeja la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 1,6 \quad (2)$$

$$Q_2 = 20 \text{ (L/min)} * 1,6 = 32 \text{ (L/min)} \quad (3)$$

$$Q_3 = 70 \text{ (L/min)} \quad (4)$$

Q₄ se despeja la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_4}{Q_3} = 1,25 \quad (5)$$

$$Q_4 = 70 \text{ (L/min)} * 1,25 = 88 \text{ (L/min)} \quad (6)$$

Q ₁ (L/min)	Q ₂ (L/min)	Q ₃ (L/min)	Q ₄ (L/min)
20	32	70	88

Tabla 2. Caudales de calibración con tanques.

El sensor de flujo electromagnético tiene un rango de medición de 1L/min a 300L/min, según las especificaciones técnicas del fabricante. De acuerdo con el diseño de la fase 3, la tubería tiene un diámetro de 1” al igual que el sensor de flujo, Según los cálculos realizados anteriormente y las pruebas de volumetría usando los tanques de volumen conocido, se determina el rango de medición de 20L/min a 88L/min, ya que a caudales menores, las bombas no tienen la capacidad de impulsar flujo de agua y así como para caudales mayores del rango definido se presenta anulación de una de las bombas debido que las pérdidas de presión superan la presión máxima de trabajo de la bomba PEDROLLO la cual es de 88 PSI aproximadamente.

Partiendo del rango definido se calcularon los caudales de los requisitos metrológicos para pruebas de calibración usando los tanques volumétricos y así tener una región de trabajo óptima.

3.5.2 Pruebas de Calibración Usando el Sensor Electromagnético como Patrón de Medición.

El caudal mínimo se determina de acuerdo a la capacidad mínima de entrega de las bombas, el cual es 30 L/min, como se ve en la ecuación 7. Despejando la fórmula de la ecuación 8, se obtiene el caudal de transición; el cual se puede ver en la ecuación 9. El caudal máximo se determina de acuerdo a los parámetros del primer

anillo de calibración y de la capacidad media que circula por el sistema, el cual es 120L/min, el cual se observa en la ecuación 10. Por último se despeja la fórmula hallada en la ecuación 11, se determina el caudal de sobrecarga, el cual se ve en la ecuación 12. En la tabla 3, se ve los caudales de referencia para el banco de ensayos y calibración los cuales cumplen los requisitos metrológicos exigidos por la norma NTC 1063.

Q₁=caudal mínimo

Q₂=caudal transición

Q₃=caudal máximo

Q₄=caudal sobrecarga

$$Q_1 = 30 \text{ (L/min)} \quad (7)$$

Q₂ se despeja la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 1,6 \quad (8)$$

$$Q_2 = 30 \text{ (L/min)} * 1,6 = 48 \text{ (L/min)} \quad (9)$$

$$Q_3 = 120 \text{ (L/min)} \quad (10)$$

Q₄ se despeja la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_4}{Q_3} = 1,25 \quad (11)$$

$$Q_4 = 120 \text{ (L/min)} * 1,25 = 150 \text{ (L/min)} \quad (12)$$

Q ₁ (L/min)	Q ₂ (L/min)	Q ₃ (L/min)	Q ₄ (L/min)
30	48	120	150

Tabla 3. Caudales de calibración con sensor patrón.

El sensor de flujo electromagnético tiene un rango de medición de 1L/min a 300L/min, según las especificaciones técnicas del fabricante. De acuerdo con el diseño de la fase 3, la tubería tiene un diámetro de 1” al igual que el sensor de flujo, Según los cálculos realizados anteriormente y las pruebas de volumetría usando el sensor de flujo E&H, se determina el rango de medición de 30L/min a 150L/min, ya que a caudales menores, las bombas no tienen la capacidad de impulsar flujo de agua y así como para caudales mayores del rango definido se presenta anulación de una de las bombas debido que las pérdidas de presión superan la presión máxima de trabajo de la bomba PEDROLLO. Partiendo del rango definido se calcularon los caudales de los requisitos metrológicos para pruebas de calibración usando el sensor de flujo E&H como patrón de medición y así tener una región de trabajo óptima sobre el anillo de recirculación de agua.

4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, CONTROL Y VISUALIZACIÓN DEL BANCO DE FLUJO DE AGUA.

Puesto que uno de los objetivos del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua es poder generar en el futuro reportes de calibración de medidores, surgió la necesidad de implementar un sistema de adquisición de datos control y visualización, que permita la imparcialidad y veracidad de dichos reportes; así como el permitir a los estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad Pontificia Bolivariana desarrollar prácticas para el desarrollo de habilidades que les permitirán a los egresados ser más integrales y competitivos en el área industrial ya que interactúan con dispositivos HMI e instrumentos de tipo industriales.

4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS COMPACTDAQ

El sistema de adquisición de datos seleccionado para el banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua, fue una arquitectura modular de la National Instruments que permite gran versatilidad puesto que cuenta con más de 50 módulos diferentes compatibles con el chasis seleccionado; el chasis cuenta con cuatro (4) ranuras para implementar cualquier configuración que se desee.

Para el banco de flujo se implementaron tres módulos para la adquisición de los datos y el control del banco; estos módulos fueron: un módulo de entrada análoga de corriente de ± 20 mA programable para la adquisición del transmisor de flujo E&H del banco, un módulo de entradas digitales de 24 Vdc para la adquisición de las señales de los sensores capacitivos que indican el nivel del tanque y por último un módulo de salidas digitales de 24 Vdc que permiten el control de los variadores de velocidad y las válvulas solenoides del banco, en la figura 25 se puede observar el chasis con sus respectivos módulos. Este chasis es un sistema que posee una

configuración maestro-esclavo debido que no posee un procesador ni un medio de almacenamiento por lo que depende de un computador para su funcionamiento. La comunicación entre el computador y el chasis NI 9174 se hace por medio de un cable USB estándar; mientras que la comunicación entre los módulos y el chasis se hace por medio de un conector RS-485. Cada módulo cuenta con una serie de especificaciones, las cuales, son de gran importancia para el correcto uso y entendimiento de cómo funciona cada módulo y su relevancia dentro del proyecto.

Figura 25. Sistema de adquisición de datos.



- **Módulo de análogo de corriente:** Este módulo cuenta con 8 canales para entrada de corriente, con rango programable de ± 20 mA posee detección de lazo abierto programable en software, con una resolución de 16 bit's con una tasa de muestreo de 200 kS/s. una de las ventajas de usar estos módulos es que internamente poseen un circuito acondicionador de señal lo cual simplifica el montaje y adquisición de los datos²¹ (figura 26).

²¹ Módulo de entrada análoga de corriente. [en línea], Disponible en: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-189/lang/es>> [18 de Mayo de 2013].

Figura 26. Módulo analógico de corriente.²²



- **Módulo de salidas digitales:** Posee 8 canales de salidas digitales que entrega de 6 a 30 Vdc, con un periodo de salida digital de 100 μ s. Permite el cambio en caliente ya sea del módulo o alguna de las entradas. Cuenta con 2.300 Vrms de protección contra sobretensiones transitorias entre los canales de salida y el plano trasero, este módulo permite el control de actuadores o relés; así como el módulo de corriente esté también posee internamente el circuito de acondicionamiento de señal facilitando el montaje en tablero eléctrico (figura 27).²³

²² Imagen tomada en: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/crio9203_1.jpg&title=NI%209203&oracleLang=esa [18 de Mayo de 2013].

²³ Módulo de salidas digitales NI 9472. [en línea], Disponible en: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-126/lang/es> [25 de Mayo de 2013].

Figura 27. Módulo de entradas digitales.²⁴



- **Módulo de entradas digitales:** Este módulo posee 8 canales de entrada digital que soportan hasta 24 Vdc con un frecuencia de muestreo de 100 μ s, permite cambios en caliente, ya sea de alguna línea de un canal o del módulo completo, posee una protección de sobre-voltaje transitorio de 2,300 Vrms entre los canales de entrada y de tierra física; al igual que los módulos anteriores éste también posee circuito acondicionador de señal que facilita el montaje debido que el dispositivo se conecta directamente al módulo (figura 28).²⁵

²⁴ Imagen tomada en: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/040729_crio9472_l.jpg&title=NI%209472&oracleLang=esa [25 de Mayo de 2013].

²⁵ Módulo de entradas digitales NI 9421. [en línea], Disponible en: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-87/lang/es> [20 de Junio de 2013].

Figura 28. Módulo de entradas digitales.²⁶



4.1.1 Adquisición de Señales del Banco de ensayos y Calibración del Banco de Flujo de Agua.

Para el control del proceso de ensayo y calibración se deben tener en cuenta las señales que son de mayor importancia dentro del proceso así como las señales que la norma técnica colombiana NTC 1063 exige que se tengan en cuenta para que el proceso sea completamente válido; en la fase actual se implementó una señal más en el proceso, que permitirá sensar los niveles de los tanques volumétricos de calibración logrando esto por medio de sensores capacitivos.

²⁶ Imagen tomada en: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/041105_crio9421_l.jpg&title=NI%209421&oracleLang=esa [20 de Junio de 2013].

a. Señales Digitales

El banco de ensayos y calibración cuenta con una serie de señales digitales tanto de sensado como de control, las señales de sensado son las que entregan los 4 sensores capacitivos; los cuales miden el nivel de cada tanque, determinando el punto cero de arranque de la medición y el punto máximo que se desea medir; siendo este último móvil lo que permite que se puedan obtener diferentes pruebas de volumen.

Las señales de control las entrega el módulo de salidas digitales NI 9472¹⁸ el cual se puede observar en la figura 9, esta señal activa los relés que permiten el acople entre la sección de control y la sección de los actuadores; esto debido que las válvulas solenoides usadas para el control de llevado y vaciado de los tanques funcionan con señales de 120 Vac.

Los sensores que se implementaron en el banco de ensayos y calibración son de tipo industrial, marca Autonics, estos poseen una distancia de medición máxima de 8mm, de cuerpo tubular de 18mm de diámetro, el cual entrega una señal digital de 24 Vdc al detectar y 0 Vdc en no detección, posee una frecuencia de respuesta máxima de 50 Hz; el dispositivo funciona con transistores tipo PNP, y posee una perilla la cual permite ajustar la distancia de detección; permitiendo así un margen muy amplio de usos(ver figura 29).²⁷

²⁷ Sensor capacitivo AUTONICS CR18-8DP. [en línea], Disponible en: <<http://www.farnell.com/datasheets/1533393.pdf>> [15 de Agosto de 2013].

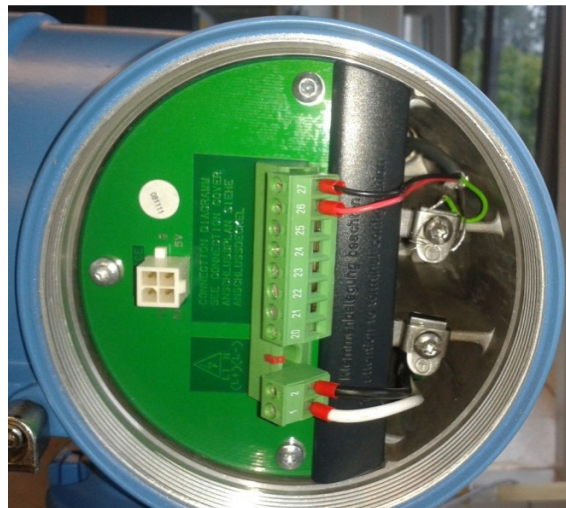
Figura 29. Sensores capacitivos.



b. Señales Analógicas

La señal analógica que se está adquiriendo del banco de ensayos y calibración es la señal de 4-20 mA del transmisor de flujo E&H que se puede observar en la figura 30, el cual permite monitorear el flujo que está pasando por la tubería, esta señal está sujeta al estándar internacional de 4-20 mA por lo que facilita su conversión a términos de la variable de proceso; puesto que esta señal es lineal.

Figura 30. Transmisor de flujo E&H.



Esta señal es capturada por el módulo de entradas análogas NI 9203¹⁴, el cual se puede ver en la figura 30. Este módulo posee una resistencia interna lo que evita la adecuación de una resistencia externa para la adquisición de la señal; como se mencionó anteriormente este módulo posee rangos programables de trabajo que pueden ir desde -20 mA hasta +20 mA, así como también se encarga de realizar todo el procesamiento y filtrado que la señal necesite de manera tal que los datos que se estén adquiriendo sean totalmente reales y confiables.²⁸

4.1 DISEÑO DEL HMI PARA EL SISTEMA SCADA DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.

Para el diseño del HMI del banco de ensayos y calibración se basó en la norma ISA 5.5 en la cual se encuentran todos los parámetros para el desarrollo de sistemas SCADA. Como la plataforma de control y adquisición de datos que se implementó en el banco de ensayos y calibración fue una plataforma de la National Instruments, el software para el desarrollo de la misma fue Labview el cual pertenece a la misma empresa y de esta forma no entrar en conflictos de incompatibilidad.

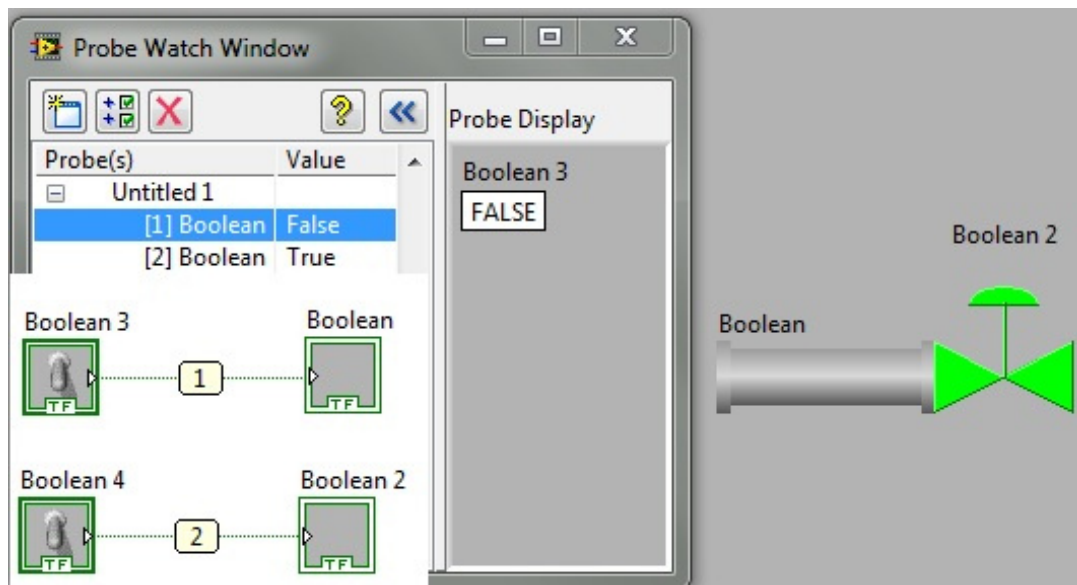
4.1.1 Programa de Control y Adquisición de Datos.

El programa de control y adquisición se diseñó a partir de los módulos con los cuales se cuentan para el desarrollo e implementación del banco de ensayos y calibración, de manera tal que se pudieran usar los módulos express que posee Labview para la identificación y uso de estos módulos; adicionalmente de uso del módulo *“Datalogging and Supervisory Control Module”* o DSC del software el cual cuenta con una librería con diferentes equipos que se pueden usar para la representación del proceso, como son: tuberías, bombas, válvulas, tanques, entre otras. Esto facilita la animación del proceso, ya que muchas de las imágenes que cuenta son

²⁸ Sensor de flujo E&H Promag 50w. [en línea], Disponible en: <<https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/1441/000/00/TI046Des.pdf>> [27 de Julio de 2013].

“boolean” o digitales; esto quiere decir que cambia su estado dependiendo si su entrada es alto o bajo, dando así una animación del proceso como se observa en la figura 31.

Figura 31. Módulos de procesos de LabView.

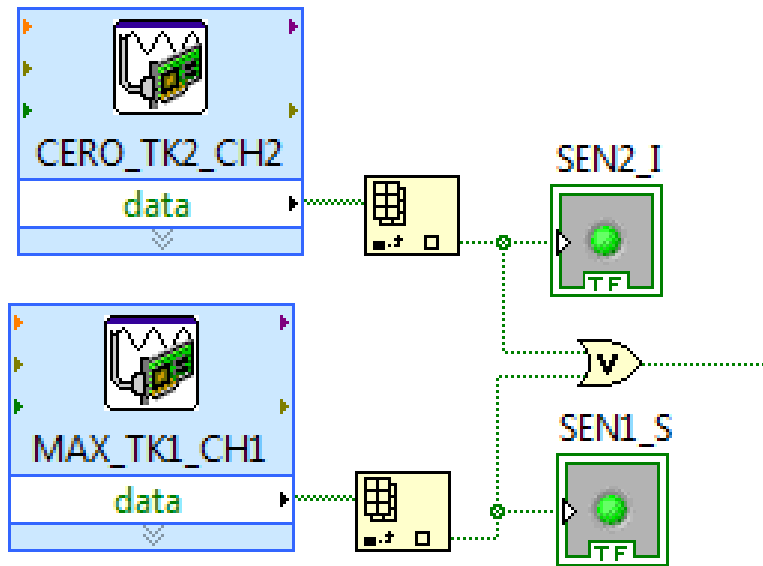


En la figura 31 se puede observar cuando el valor de la entrada es alto o verdadero la válvula se enciende mientras que en la tubería al tener en su entrada un valor de bajo o falso el estado de esta se encuentra apagado; esto permite la implementación del HMI fácilmente pero a su vez de alto nivel de calidad.

El programa de adquisición y control se dividió en varias secciones de manera tal que facilite el entendimiento y la lógica del programa. Estas secciones dependen de los dispositivos que se están sensando o controlando, como lo son: el transmisor de flujo E&H y los sensores capacitivos o los variadores de velocidad y las válvulas solenoides respectivamente. Para la adquisición de los datos de los sensores involucrados en el proceso se usaron los módulos express de entradas y salidas que permiten la conexión directa del programa con los diferentes módulos que se encuentren conectados, esto permite que el desarrollo del programa sea más rápido

y eficaz evitando errores de programación. En la figura 32 se observa dos módulos de entrada los cuales permiten leer el estado de los sensores capacitivos que indican el nivel inferior y superior de los tanques.

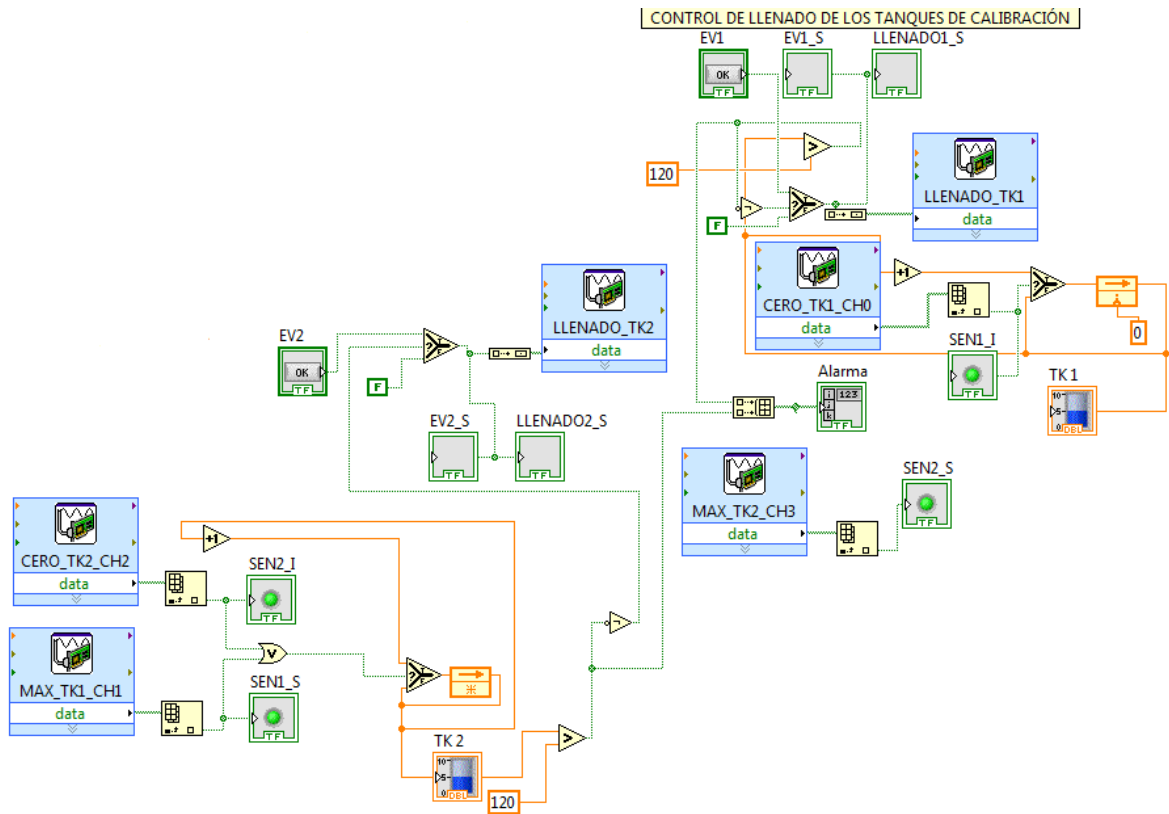
Figura 32. Módulo express de entrada.



4.1.2 Control de llenado de los Tanques Volumétricos de Calibración.

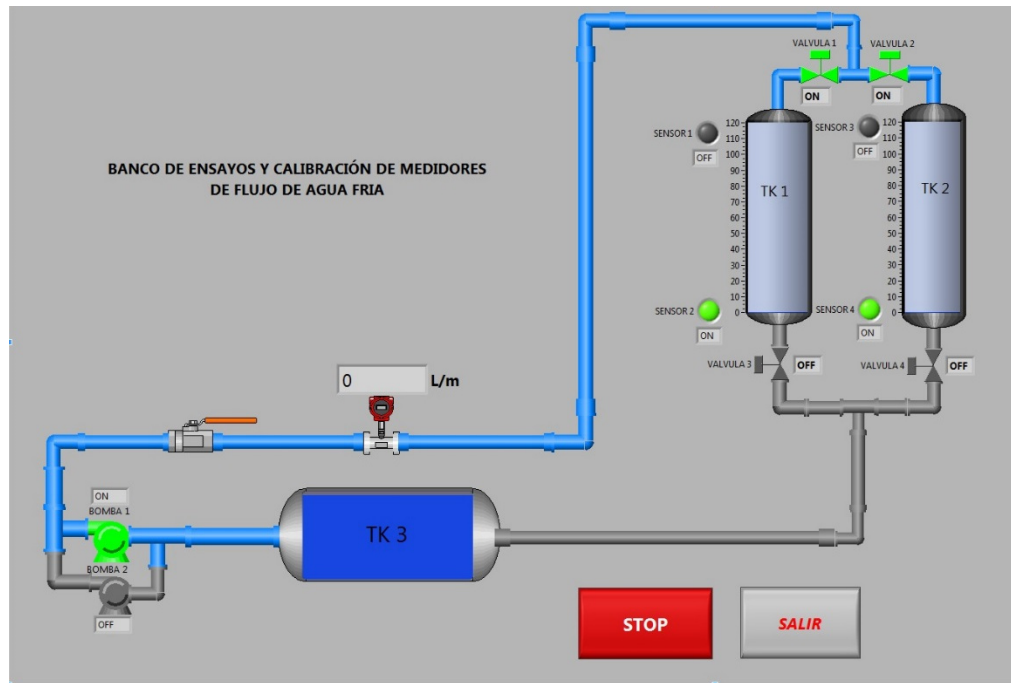
Para el llenado de los tanques se implementó un control on/off el cual por medio de un pulsador se abren o cierran las válvulas de llenado así como la animación de la tubería como se puede ver en la figura 33, el llenado de los tanques depende de la prueba que se vaya a realizar puesto que depende si la prueba se hace con caudal máximo (Q_{max}), caudal de transición (Q_t) o caudal mínimo (Q_{min}) ya que de esto depende el volumen a llenar de los tanques.

Figura 33. Llenado de los tanques.



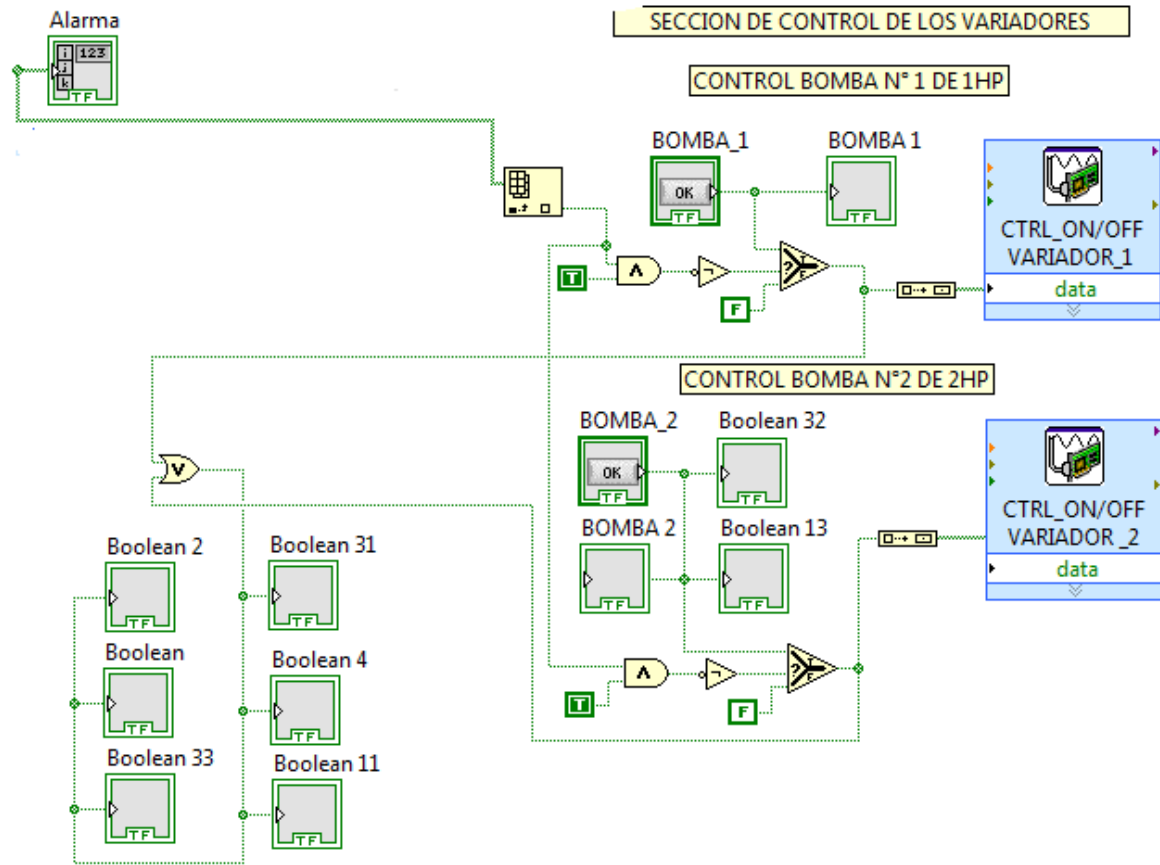
Como se mencionó anteriormente estas acciones de control también conllevan una acción en la pantalla HMI del sistema de supervisión de manera tal que le permita al operario determinar en qué estado se encuentra el proceso, esto se hace mediante el cambio en el color de los dispositivos en el HMI como se puede ver en la figura 34, la cual ilustra el proceso de llenado de los tanques.

Figura 34. Pantalla HMI de llenado de tanques.



Por medio del mismo sistema se activa o desactiva la bomba que se desee encender, o si es el caso encender las dos al tiempo; adicionalmente se implementó un sistema de protección para las bombas el cual consiste en apagarlas automáticamente si alguna de las válvulas se encuentran cerradas para evitar un recalentamiento en las bombas y por ende el daño de las mismas. En la figura 35 se puede observar el control de las válvulas.

Figura 35. Protección de bombas.

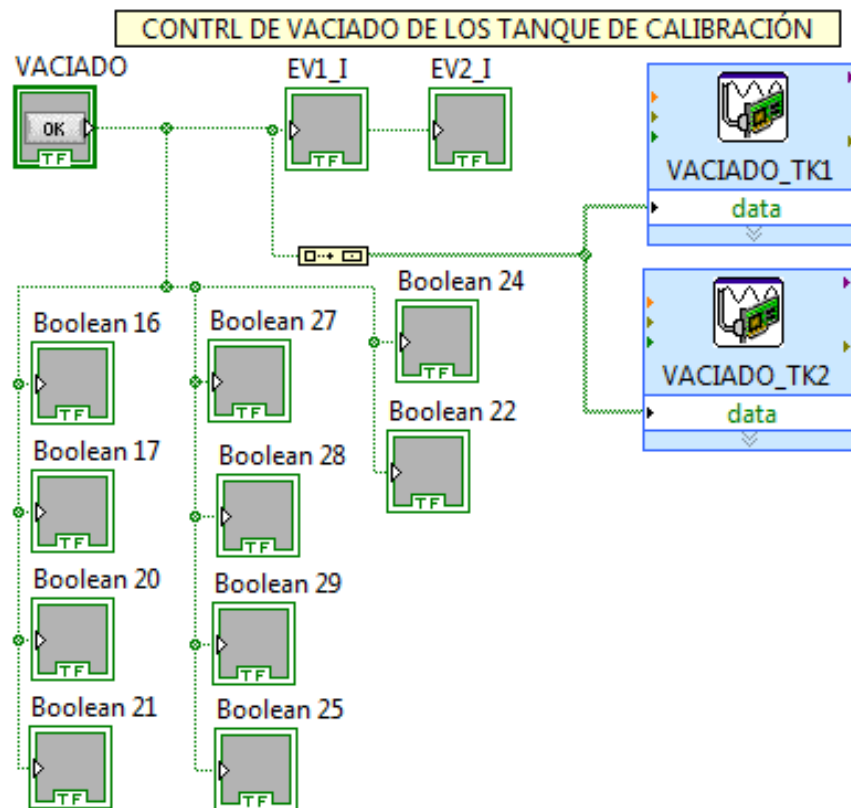


4.1.3 Control de Vaciado de los Tanques Volumétricos de Calibración.

La sección para el control de vaciado de los tanques se puede observar en la figura 36, este proceso se desarrolló de manera tal que usando dos salidas digitales que activan los relés de estado sólido o SSR, los cuales acondicionan la señal para que cierren o abran el contacto que permite la energización o des-energización de las válvulas, dependiendo del estado del pulsador de vaciado, permitiendo así extraer todo el aire de la línea de proceso antes de comenzar la prueba de calibración o desocupar por completo los tanques después de haber realizado la prueba.

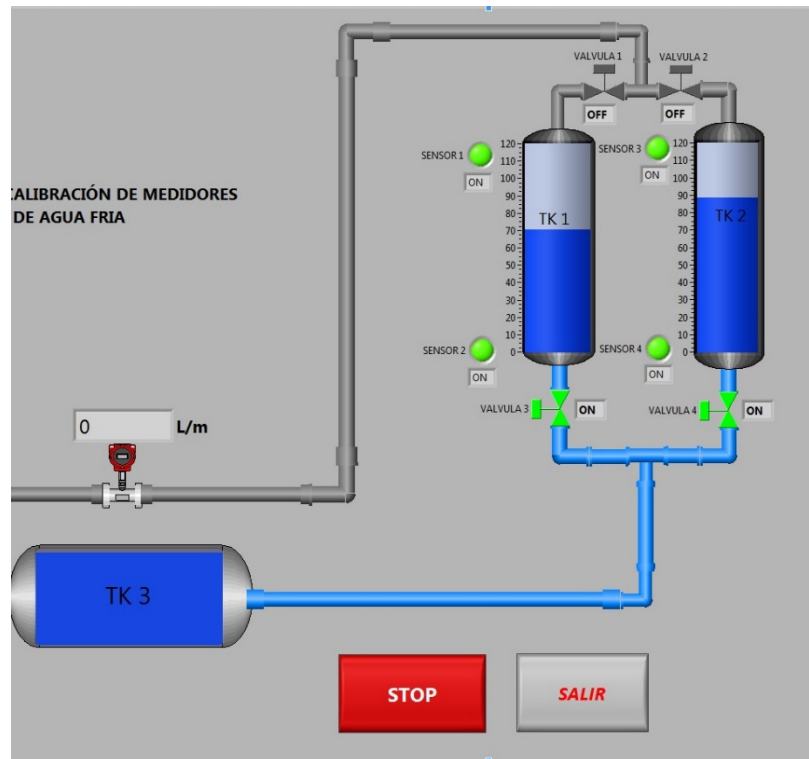
Como se puede observar en la figura 36 el pulsador de vaciado es el que controla la acción de las válvulas, así como también habilita o deshabilita la animación de la tubería y válvulas en la HMI.

Figura 36. Vaciado de los tanques.



En la figura 37 se puede ver que el botón o pulsador de vaciado se encuentra activo y por esto las válvulas y la tubería se activan, indicándole al usuario que el proceso se encuentra en descarga del agua de los tanques hacia el tanque cisterna.

Figura 37. Pantalla HMI del Vaciado de los Tanques.

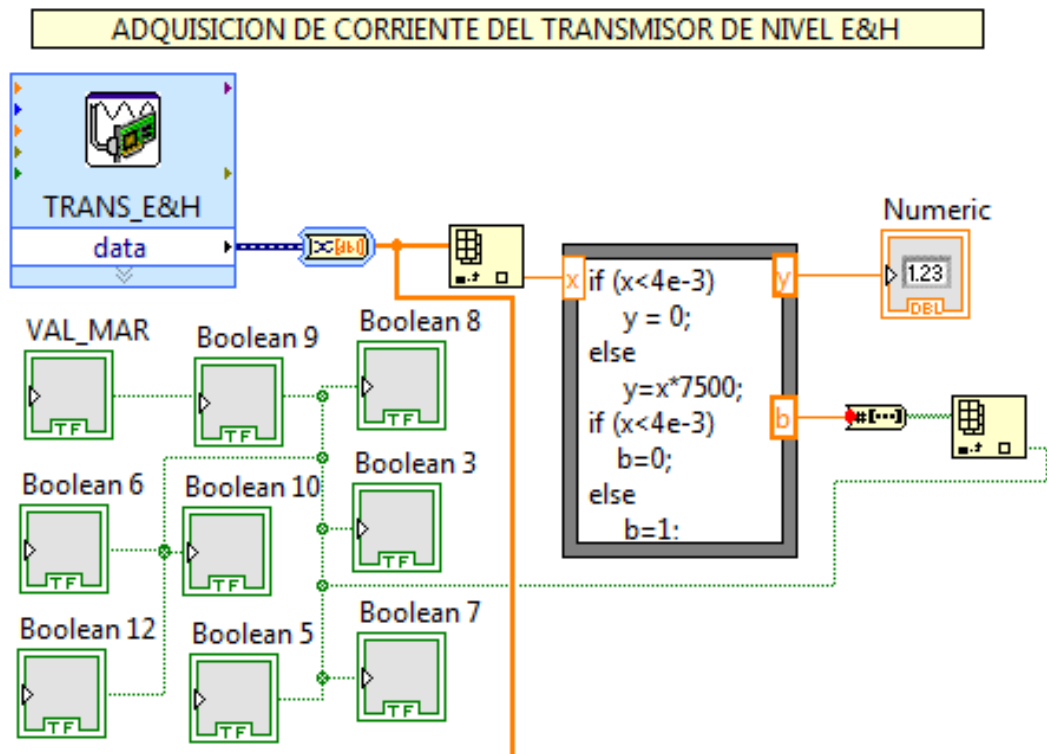


4.1.4 Adquisición de la Señal de Corriente del Transmisor de Flujo E&H.

Como se mencionó en el numeral 4.1.1 la adquisición de la señal de corriente del transmisor E&H se realiza por medio del módulo NI 9203 esta señal la entrega el módulo en términos de corriente, por lo que hay que realizar una transformación para poder visualizar esta información en términos de la variable de proceso la cual en este caso es el flujo; como se sabe que la señal del transmisor es una señal estándar de 4-20 mA la cual al ser lineal hace más sencillo determinar el valor por el cual se debe multiplicar la señal para obtener los datos en términos de la variable de proceso.

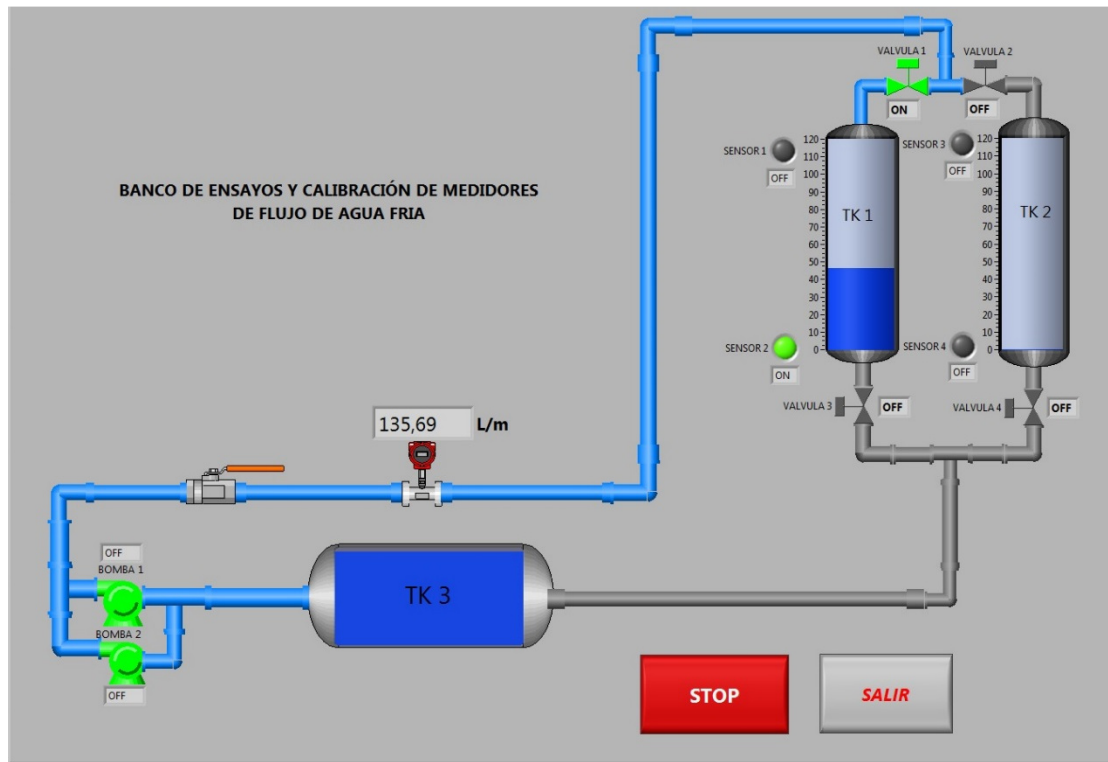
Para el desarrollo de esta sección del programa se usó el express module de entrada análoga para llevar la señal al programa e implementar la transformación, esta se hizo por medio de código usando el formula node de labview; permitiendo que por medio de código escrito se transforme la señal y se pueda visualizar como se ve en la figura 38.

Figura 38. Adquisición y transformación de la señal análoga.



Adicionalmente a la transformación de la señal en términos de la variable de proceso se implementó un arreglo el cual permite que en el HMI se observe el cambio de la tubería de gris a azul para indicar el estado en el que se encuentra el proceso como se ve en la figura 39. Este cambio depende del código que se implementa, lo que quiere decir es que si la señal del transmisor es menor a 4 mA la tubería no se enciende lo que indica tubería vacía; y cuando el valor de la corriente supera este rango se puede observar que la tubería se enciende indicando tubería llena.

Figura 39. Pantalla HMI del funcionamiento del sensor.



5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYOS Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.

Las pruebas de funcionamiento y comisionamiento del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua se llevaron a cabo para determinar el buen funcionamiento de todos los dispositivos tanto eléctricos, electrónicos y electromecánicos que conforman el primer anillo de calibración del banco de flujo y generar una documentación práctica para su correcto manejo, al igual que una lista de verificación que ayuda a determinar si cada uno de los dispositivos están aptos para realizar las pruebas.

Estas pruebas se hicieron según recomendaciones de los manuales de funcionamiento de cada equipo, la norma técnica colombiana NTC 1063 y pruebas no normalizadas, que ayudaran a determinar el error en la medición, precisión y repetibilidad.

5.1 COMISIONAMIENTO DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AGUA.

El comisionamiento son las pruebas preliminares, de pre-arranque y pruebas de funcionamiento que se deben practicar a cada dispositivo antes de la puesta en marcha del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua.

5.1.1 Chequeo Preliminar.

Este chequeo consiste en una minuciosa revisión de cada uno de los dispositivos que conforman el primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua, con el fin de garantizar el óptimo funcionamiento de cada uno de ellos.

a. Chequeo de la tubería y accesorios.

- ✓ Verificación de la instalación de la válvula mariposa principal.
- ✓ Comprobación que los empaques y abrazaderas se encuentre correctamente puestos y ajustadas.
- ✓ Confirmar que las uniones universales se encuentre totalmente cerradas y sin fugas.
- ✓ Corroborar que la tubería y frame se encuentren correctamente aterrizados a mismo punto de tierra.
- ✓ Corroborar que el manómetro se encuentre en correcto funcionamiento.
- ✓ Corroborar que las válvulas mariposas de recirculación y de llenado de los tanques de calibración se encuentre correctamente ajustadas.
- ✓ Comprobar que las válvulas de recirculación y de paso para llenado de los tanques de calibración abran y cierren fácilmente.

b. Chequeo de los tanques de calibración.

- ✓ Comprobar que los alivios de presión se encuentren totalmente despejados.
- ✓ Verificar que las válvulas de las mirillas de nivel se encuentre en correcto estado de funcionamiento.

c. Chequeo de los equipos rotativos.

- ✓ Verificar la placa del equipo la cual debe coincidir con la del manual.
- ✓ Comprobar posibles averías externas de los impulsores.
- ✓ Comprobar las buenas condiciones de la pintura y aislamientos de las bombas.
- ✓ Inspección visual de la tubería de succión de cada bomba.

d. Chequeo equipos eléctricos.

- ✓ Motores.
 - Verifique la ausencia de daños mecánicos en los motores.
 - Verifique los sentidos de rotación de cada una de los motores.
 - Mida la impedancia de cada devanado de cada motor de manera que se verifique el buen estado de cada uno.
 - Verifique la correcta conexión de los motores a la tierra física de manera tal que este bien aterrizado.

- ✓ Variadores de Velocidad.
 - Verifique que las conexiones de alimentación y de salida hacia las bombas se encuentre acorde a lo exigido por el fabricante.
 - Corrobore que las conexiones a tierra cumplan con los requisitos técnicos dados por el fabricante.
 - Comprobar la correcta conexión a las borneras de alimentación.

- ✓ Tablero eléctrico.
 - Inspección para verificar la ausencia de errores de conexión.
 - Comprobar que el tablero se encuentre completamente aterrizado según las normas técnicas nacionales.
 - Compruebe que el totalizador y los breakers se encuentren acordes al diagrama eléctrico.

5.2 PUESTA EN MARCHA DEL PRIMER ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL BANCO DE FLUJO.

5.2.1 Puesta en Marcha del Tablero Eléctrico y de Control.

Para la puesta en marcha del tablero eléctrico y de control se tuvieron una lista de precauciones de manera tal que se asegura la seguridad e integridad de los equipos y el operario; la primera precaución fue una inspección visual detallada, con el fin de verificar la ausencia de cableado suelto o elementos que pudieran generar cortocircuito, así como la verificación que todo el cableado se encontrara ajustado y conectado en sus respectivas borneras o breakers. Luego se verifica las conexiones eléctricas principales en la toma corriente el cual fue modificado para eliminar clavijas que podrían representar riesgos para los estudiantes o equipos; dicha modificación se puede observar en la figura 40.

Figura 40. Conexión eléctrica principal.



Por último se procedió a activar el breaker principal alojado en la caja de tacos correspondiente al circuito 1-3-5 de tal manera que se energizara la red eléctrica, luego se activó el totalizador y los respectivos breakers de cada dispositivo; de esta forma se corroboró el correcto funcionamiento de los equipos y del tablero eléctrico.

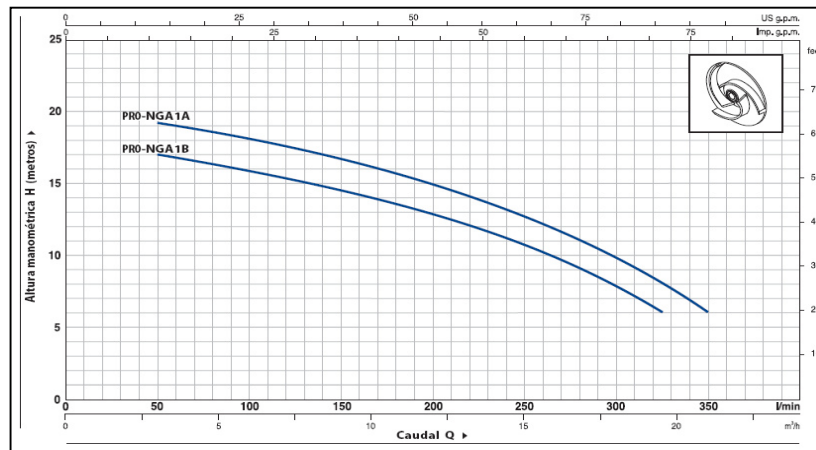
Como última medida de seguridad al tablero eléctrico se dotó con un botón de parada de emergencia situado en la parte frontal de la puerta del tablero, esto con el fin de realizar un parado rápido ante cualquier anomalía; este botón permite disparar una bobina dentro del totalizador lo que hace que dicho dispositivo se dispare y se desactive.

5.2.2 Puesta en Marcha de los Variadores y las Bombas Centrifugas.

a. Bombas.

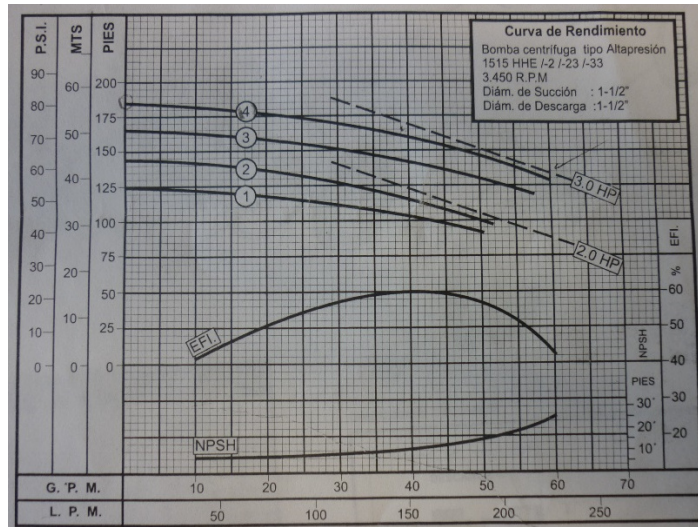
La curva característica de las bombas que se pueden ver en la figura 41 y figura 42, se puede observar los caudales en función de la altura lineal y sin ninguna clase de pérdidas por codos o reducciones.

Figura 41. Curva característica Bomba PEDROLLO.²⁹



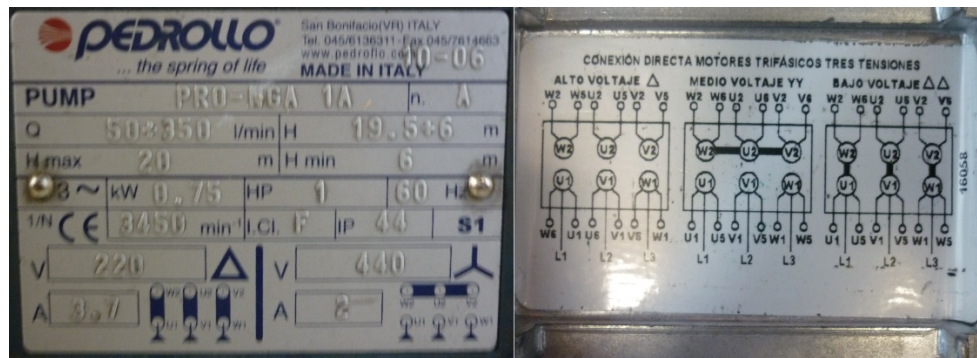
²⁹ Imagen tomada en: PEDROLLO, PRO-NGA 1A, Bombas centrífugas en acero inoxidable con rodete abierto. [29 de Agosto de 2013].

Figura 42. Curva característica Bomba BARNES.³⁰



Luego se procedió a revisar las placas de identificación de las bombas las cuales se observan en la figura 43, donde muestra el tipo de conexiones dependiendo del voltaje de alimentación, se conectaron las bombas *PEDROLLO* y *BARNES* en conexión triángulo y triángulo-triángulo respectivamente, tal cual lo indican las placas de los motores. Una vez realizada las conexiones se inspeccionó el cableado y conexiones en las borneras de los motores.

Figura 43. Especificaciones Bombas.

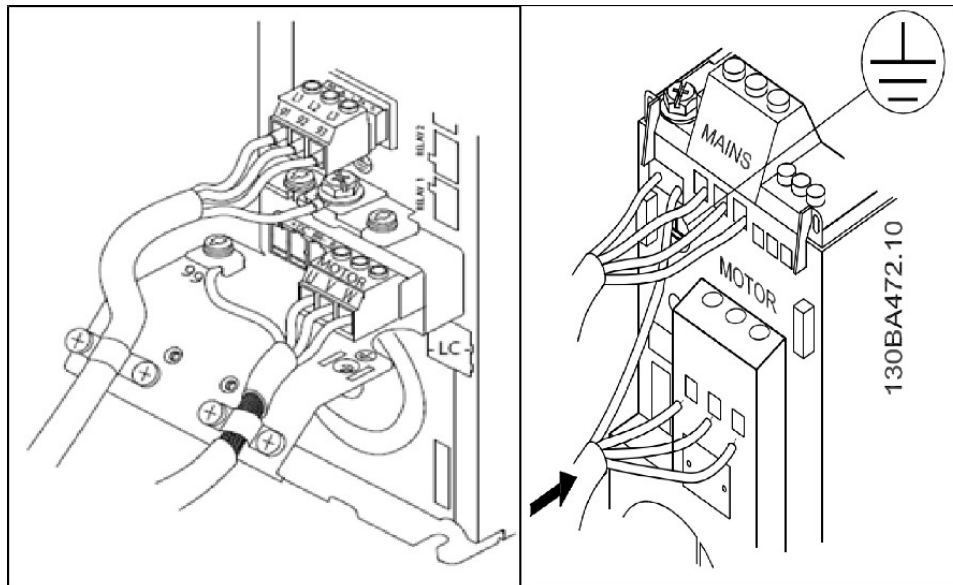


³⁰ Imagen tomada en: BARNES, 1515HHE-23, Bomba centrífuga con rodete cerrado del alta presión. [29 de Agosto 2013].

b. Variadores de velocidad.

Para la puesta en marcha de los variadores de velocidad se revisaron las conexiones de suministro de voltaje, conexiones a tierra y las conexiones del motor a los variadores, de acuerdo al manual de funcionamiento de cada uno de estos. Debido a que se desea que cada bomba funcione independientemente se conecta la bomba *BARNES* al variador *DANFOSS VLT HVAC FC 102* y la bomba *PEDROLLO* al variador *DANFOSS VLT MICRO FC 51* las conexiones eléctricas de los variadores se pueden ver en la figura 44, donde a la izquierda se observa las conexiones para el variador *DANFOSS VLT HVAC FC 102* y a la derecha el variador *DANFOSS VLT MICRO FC 51*.

Figura 44. Conexiones eléctricas de los variadores.



Luego de realizar la inspección visual, se procedió con la puesta en marcha de los cuatro dispositivos, donde se introduce los parámetros de los motores en los variadores de frecuencia y posteriormente se realiza la adaptación automática de los motores usando la herramienta AMA de los variadores de velocidad.

Para el variador con referencia *DANFOSS VLT HVAC FC 102* se desarrolla de la siguiente forma:

- Pulse **[QUICK MENU]**
 - Ingrese a '**Q2 Ajuste rápido**'.
 - Ingrese parámetro '**1-20 Potencia del motor (KW)**'
 - Ingrese parámetro '**1-22 Tensión del motor (V)**'
 - Ingrese parámetro '**1-23 Frecuencia del motor (Hz)**'
 - Ingrese parámetro '**1-24 Intensidad del motor (A)**'
 - Ingrese parámetro '**1-25 Velocidad nominal del motor (RPM)**'

Luego de haber introducido los parámetros anteriores se activa la adaptación automática del motor (AMA) para caracterizar la bomba, siguiendo los siguientes pasos:

- Pulse **[QUICK MENU]**
 - Ingrese a '**Q2 Ajuste rápido**'.
 - Ingrese el parámetro '**5-12 Terminal 27 Entrada digital**'
 - Seleccione '**[0] Sin función**'
- Pulse **[QUICK MENU]**
 - Ingrese a '**Q3-1 Ajuste de función**'.
 - Ingrese a '**Q3-10 Ajuste motor adv**'
 - Ingrese parámetro '**1-29 Adaptación automática motor**'
 - Seleccione '**[1] Act. AMA Completo**'
 - Pulse la tecla **BACK**, para salir a la pantalla principal.
 - Presione **[Hand On]**, para iniciar la adaptación automática del motor. Una barra de progreso le indicará que se está llevando a cabo el **AMA**.
 - Al finalizar la adaptación automática, la pantalla le indicará, pulse **[OK]** para finalizar el **AMA**.

Pulse **[Hand On]** para encender la salida del variador hacia la bomba y **[OFF]** para apagar la bomba.³¹

Para el variador con referencia *DANFOSS VLT MICRO FC 51* se desarrolla de la siguiente forma:

- Pulse **[MENU]**
 - Ingrese a '**QM1**'.
 - Ingrese parámetro '**1-20 Potencia del motor (KW)**'
 - Ingrese parámetro '**1-22 Tensión del motor (V)**'
 - Ingrese parámetro '**1-23 Frecuencia del motor (Hz)**'
 - Ingrese parámetro '**1-24 Intensidad del motor (A)**'
 - Ingrese parámetro '**1-25 Velocidad nominal del motor (RPM)**'

Luego de haber introducido los parámetros anteriores se activa la adaptación automática del motor (**AMT**) para caracterizar la bomba, siguiendo los siguientes pasos:

- Pulse **[MENU]**
 - Ingrese a '**QM1**'.
 - Ingrese parámetro '**1-29 Adaptación automática motor**'
 - Seleccione '**[1] Act. AMT**'
 - Pulse la tecla **BACK**, para salir a la pantalla principal.
 - Presione **[Hand On]**, para iniciar la adaptación automática del motor. Una barra de progreso le indicara que se está llevando a cabo el **AMT**.
 - Al finalizar la adaptación automática, la pantalla le indicara, pulse **[OK]** para finalizar el **AMA**.

³¹ DANFOSS, Manual de funcionamiento Convertidor de frecuencia *DANFOSS VLT HVAC FC 102*. [02 de Septiembre de 2013].

Pulse **[Hand On]** para encender la salida del variador hacia la bomba y **[OFF]** para apagar la bomba.

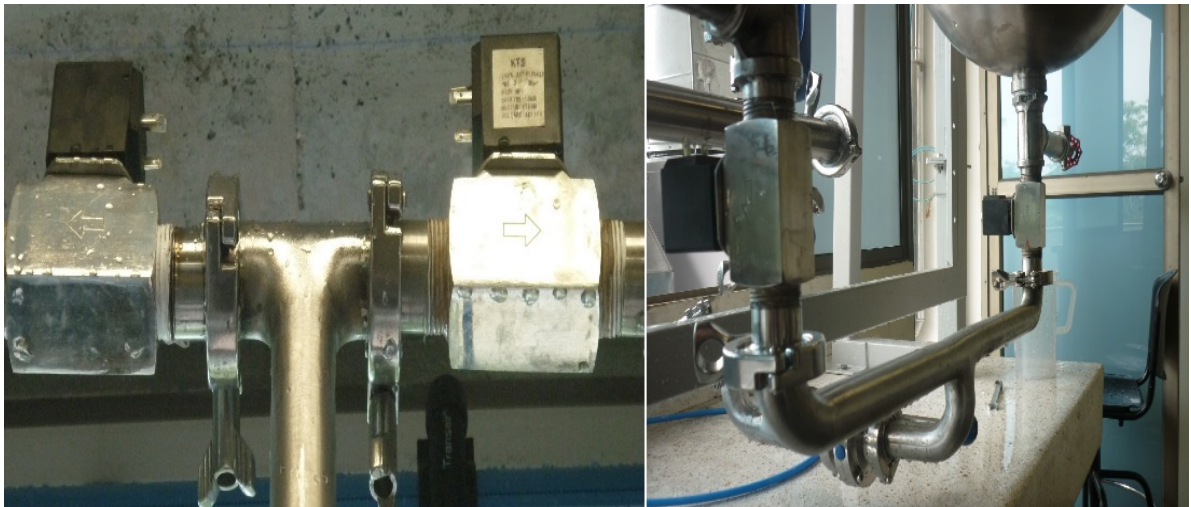
5.2.3 Válvula Solenoides y Sensores Capacitivos.

a. Válvulas Solenoides

Para la puesta en marcha de las válvulas solenoides se tuvieron dos medidas de seguridad; la primera fue la prueba de funcionamiento en vacío la cual consto de energizar la bobina de la válvula y corroborar su correcto funcionamiento. La segunda fue la puesta en marcha con los relés los cuales acondicionan la señal de tal forma que permite controlar las válvulas por medio del sistema HMI.

Luego de haber hecho estas dos pruebas se prosiguió a realizar la implementación en el anillo de calibración y posteriormente corroborar el funcionamiento de las mismas, en la figura 45 se observan las válvulas puestas en sus respectivos lugares.

Figura 45. Válvulas solenoides.



b. Sensores Capacitivos.

Los sensores capacitivos se implementaron de manera tal que permitieran dar un inicio y un final a la prueba de calibración, por lo que su distribución dentro del banco fue muy importante, en la figura 46 se puede observar la ubicación de los sensores en el tubo que permite visualizar el nivel de los tanques.

Adicional a lo anterior se ajustó el sensor de manera tal que tomara la lectura cuando el nivel del agua llegara a su punto de contacto con dicho dispositivo, este ajuste se desarrolló en el momento de las pruebas de volumetría de cada tanque.

Figura 46. Sensores capacitivos implementados.



5.3 PRUEBAS DE VOLUMETRÍA

Las pruebas de volumetría por comparación se realizaron para verificar el volumen de los tanques y la posterior marcación en las mirillas de nivel, que permiten el desarrollo de pruebas de calibración y el ajuste del sensor con el que se da fin a la prueba, así como el error en la medida dependiendo de los parámetros entregados por el fabricante. Dichas pruebas se realizan con volúmenes patrones, los cuales se encuentran calibrados.

Se usaron 3 patrones diferentes con el fin de determinar un error más preciso en la medida, ya que se sacó un promedio de las tres mediciones y se determinó un error con base a ese promedio; el valor teórico de los tanques fue el calculado mediante las fórmulas de volumen para cilindros y semiesferas, como se puede ver a continuación.

- Volumen del cilindro:

$$v_c = \pi * r^2 * h \quad (13)$$

$$v_c = \pi * (16.5)^2 * 135$$

$$v_c = \frac{147015}{4} \pi$$

$$v_e = \frac{2}{3} * \pi * r^3 \quad (14)$$

$$v_e = \frac{2}{3} * \pi * (16.5)^3$$

$$v_e = \frac{11979}{4} \pi$$

$$v_T = v_c + v_e \quad (15)$$

$$v_T = \frac{147015}{4} \pi + \frac{11979}{4} \pi$$

$$v_T = \frac{79497}{2} \pi \text{ o } 124.87 L$$

Los ensayos aproximados de verificación de volumetría realizados en esta prueba se llevaron a cabo con 3 patrones de comparación de 1 litro, 7 litros y 10 litros respectivamente, la dinámica de la prueba consto en abrir el lazo cerrado para depositar el agua en cada uno de los tanques y posteriormente comparar con el valor calculado.

En la tabla 4 se pueden observar los resultados de las pruebas de aforación de los tanques.

	1 litro (litros)	7 litros (litros)	10 litros (litros)	Volumen teórico (litros)	Volumen experimental (litros)	% de error (%)
Prueba 1	122.2	119.7	120.56	124.87	120.82	3.24
Prueba 2	123.4	120.9	122	124.87	122.1	2.22
Prueba 3	121.8	125.1	118.95	124.87	121.95	2.34

Tabla 4. Aforación de los tanques.

Luego de haber realizado la aforación o calibración respectiva de los tanques se procedió a cerrar el lazo de calibración y realizar las pruebas de llenado de los tanques por un tiempo de 30 segundos, esta prueba se desarrolló con 3 frecuencias diferentes, para cada una de las frecuencias se repetía 4 veces la prueba. Los datos de las pruebas realizadas se pueden observar en la tabla 5.

PRUEBAS DE VOLUMETRIA						
Prueba 1. Variador de Velocidad a 20 Hz						
Variador	Manómetro	tiempo de la prueba (s)	Volumen (L)	Caudal teórico (l/min)	Sensor de Flujo (l/min)	Error (%)
Frecuencia (Hz)	Presión (PSI)					
20	9	30	6,428	12,856	13,251	2,9809071
20	9	30	6,692	13,384	13,695	2,27090179
20	8,8	30	6,391	12,782	13,148	2,78369334
20	9	30	6,537	13,074	13,361	2,14804281
Prueba 1. Variador de Velocidad a 40 Hz						
Variador	Manómetro	tiempo de la prueba (s)	Volumen (L)	Caudal teórico (l/min)	Sensor de Flujo (l/min)	Error (%)
Frecuencia (Hz)	Presión (PSI)					
40	27	30	17,601	35,202	36,251	2,89371328
40	27	30	18,105	36,21	37,275	2,85714286
40	27	30	17,625	35,25	36,301	2,89523705
40	26	30	17,697	35,394	36,424	2,82780584
Prueba 1. Variador de Velocidad a 60 Hz						
Variador	Manómetro	tiempo de la prueba (s)	Volumen (L)	Caudal teórico (l/min)	Sensor de Flujo (l/min)	Error (%)
Frecuencia (Hz)	Presión (PSI)					
60	54	30	27,489	54,978	56,458	2,62141769
60	54	30	27,194	54,388	55,784	2,50250968
60	53	30	27,361	54,722	56,328	2,85115751
60	54	30	27,519	55,038	56,605	2,76830669

Tabla 5. Volumetría usando sensor E&H.

5.4 ELABORACIÓN DE GUÍA PRÁCTICA PARA EL LABORATORIO

La guía práctica de laboratorio para la utilización del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua se enfoca en el desarrollo de pruebas de calibración, el conocimiento de todos los dispositivos, pruebas de funcionamiento de cada elemento del banco, programación básica del variador de frecuencia y sensor de flujo y pruebas para identificar la curva de histéresis del sensor de flujo. La guía práctica para manejo del primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua se encuentra en el Anexo A.

RECOMENDACIONES

Se debe cambiar las válvulas solenoides de la parte superior en la entrada de los tanques, debido a que la reducción interna de la válvula produce una gran caída de presión ocasionando así caída en el caudal, reduciendo el rango de trabajo de las bombas y por ende de las pruebas, esto se puede evitar implementando una válvula que conserve lo más aproximado el diámetro de la tubería.

Según la norma NTC 1063 se debe medir la temperatura a la entrada y a la salida, por lo que se deben implementar una RTD por cada tanque y otra antes del sensor de flujo de manera tal que se pueda cumplir este requerimiento de la norma.

Se deben implementar medidas de protección para cada bomba de manera tal que al llegarse a anular físicamente una, la medida de protección actúe sobre la misma y la desenergice evitando daños en los devanados de la misma.

Es necesario monitorear y realizar un mantenimiento preventivo a los equipos para garantizar su vida útil, al igual monitorear el agua contenida en el tanque de almacenamiento no presente ninguna alteración o presencia de sedimentos que puedan desgastar la vida útil de las bombas y sensor de flujo.

CONCLUSIONES

- Se implementó el primer anillo de calibración el cual fue desarrollado a partir de los requerimientos de las fases 1 y 2, así como los contemplados en la norma NTC 1063, para los ensayos de calibración por volumen conocido.
- El banco de flujo cuenta con un sensor electromagnético marca E&H al cual se le aplicaron las pruebas de calibración usando los tanques de volumen conocido, por lo cual permite desarrollar pruebas de calibración al usarlo como patrón y conectando otro medidor en serie con este; esto es posible gracias a la flexibilidad y versatilidad que posee el banco de flujo.
- En la depuración de la ingeniería detallada se tuvo en cuenta el espacio del laboratorio, lo que dio como resultado el diseño de dos tanques para los ensayos de calibración, permitiendo de esta forma que el frame mecánico distribuyera de mejor forma las fuerzas ejercidas por los tanques.
- Para el monitoreo y control del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua se implementó una plataforma de National Instruments, la cual por su diseño modular brindo la flexibilidad que se ha estado desarrollando en el banco de flujo; sin perder la robustez del banco y el enfoque industrial.
- Para la manipulación del banco de flujo se diseñó una pantalla HMI la cual se implementó basado en la norma internacional ISO 5.5 la cual determina los requerimientos mínimos que se deben tener en términos de distribución, color y mensajes.

- Las pruebas que se implementaron para el primer anillo de calibración de medidores de flujo de agua tienen la finalidad de comprobar la velocidad de respuesta; así como el correcto funcionamiento de cada uno de los dispositivos involucrados en el anillo de calibración, permitiendo así el desarrollo de ensayos de calibración acordes a los requerimientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 1063.
- Para el desarrollo del dossier del proyecto se tuvieron en cuenta cada uno de los dispositivos inmersos en el anillo de calibración así como sus respectivos manuales de usuario, garantizado de esta forma el buen uso de los equipos.
- Se elaboró una guía práctica para el uso del banco de ensayos y calibración de medidores de flujo de agua; con el fin de ser aplicada en la especialización de Control e Instrumentación Industrial, permitiendo la puesta en práctica de los conocimientos de metrología e instrumentación.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Medición de flujo: La variable más medida de la industria [en línea] <<http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-completo-instrumentacion-industrial/218-medicion-de-flujo-la-variable-mas-medida-de-la-industria>>. [2 de Abril de 2013].
2. ANTONIO CREUS SOLÉ, Instrumentación Industrial, 1997 ALFAOMEGA, 6 ed, Barcelona, España: Marcombo ISBN 958-682-135-8. [17 de Abril de 2013]
3. FLUJO EN REGIMEN ESTACIONARIO. [en línea] Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/112803082/Flujo-en-regimen-estacionario>>. [5 de Agosto de 2013]
4. MIKEL IZQUIERDO, Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, 2008 editorial medica panamericana, 311p. [17 de Julio de 2013]
5. HUGO RAMOS Y PABLO ESTRELLA, física 2, 2009 editorial Cengage Learning, 305p. [14 de Agosto de 2013]
6. M. LOPEZ GARCIA Y M. RAMON, Medición de Caudal, 2007, 21p, Trabajo de grado [en línea], Disponible en <http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf>. [23 de Agosto de 2013]
7. LA TURBULENCIA DE LOS FLUIDOS [en línea], Disponible en <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/150/htm/sec_18.htm> [16 de Junio de 2013]

8. NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS NTC1063. Medición del flujo de agua en conductos cerrados a sección llena, 3^a actualización editada 2007-06-20. [16 de Abril de 2013]
9. LATORRE, ANDRES RICARDO, Diseño de un banco de ensayo para la medición de flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombiana NTC1063, Libro Tesis, 188p. [25 de Agosto de 2013]
10. CACERES, HERNAN M., RUEDA FABIO A., Depuración de la ingeniería detallada e implementación básica del banco de ensayo para la medición del flujo de agua basado en la Norma Técnica Colombia NTC 1063, Libro Tesis. [22 de Julio de 2013]
11. BARNES, 1515HHE-23, Bomba centrífuga con rodete cerrado del alta presión. [29 de Agosto de 2013]
12. DANFOSS, Manual de funcionamiento Convertidor de frecuencia VLT MICRO FC 51. [02 de Septiembre de 2013]
13. Módulo de entrada análoga de corriente NI 9203. [en línea], Disponible en: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-189/lang/es>>. [18 de Mayo de 2013]
14. Módulo de salidas digitales NI 9472. [en línea], Disponible en: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-126/lang/es>>. [25 de Mayo de 2013]
15. Módulo de entradas digitales NI 9421. [en línea], Disponible en: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-87/lang/es>>. [20 de Junio de 2013]
16. Sensor capacitivo AUTONICS CR18-8DP. [en línea], Disponible en: <<http://www.farnell.com/datasheets/1533393.pdf>>. [15 de Agosto de 2013]

17. Sensor de flujo E&H Promag 50w. [en línea], Disponible en:
<<https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/1441/000/00/TI046Des.pdf>> [27 de Julio de 2013]
18. DANFOSS, Manual de funcionamiento Convertidor de frecuencia *DANFOSS VLT HVAC FC 102*. [02 de Septiembre de 2013]
19. ROTAMETROS FUNDAMENTOS Y CALIBRACION [en línea]
<<http://www.efn.uncor.edu/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/Teoria%20Rotametro.pdf>>. [20 de Agosto de 2013]
20. INSTRUMENTACION DE MEDICION Y CONTROL [en línea]
<<http://glosarios.servidor-alicante.com/instrumentacion>> [29 de Agosto de 2013].