

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE  
MEDIDORES DE CAUDAL TIPO CORIOLIS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO  
ESTÁTICO**

**WEIMAR EDUARDO MANTILLA GUTIÉRREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2012**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE  
MEDIDORES DE CAUDAL TIPO CORIOLIS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO  
ESTÁTICO**

**WEIMAR EDUARDO MANTILLA GUTIÉRREZ**

**Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
JAVIER RUGELES PÉREZ  
Ingeniero Mecánico**

**Codirector  
JOSÉ AUGUSTO FUENTES  
Ingeniero Mecánico  
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2012**

## DEDICATORIA

*A mis padres, Carmen Isbelia Gutiérrez y Luis Eduardo Mantilla por el amor, la confianza y el apoyo incondicional que me brindaron para alcanzar esta gran meta de mi vida; y por su inquebrantable fe en la superación de sus hijos.*

*A mis Hermanas Carmen Yulieth y Lizeth Tatiana, por su cariño y sus grandes consejos.*

*A Wendy Mabel Mancipe por su gran ayuda, comprensión y cariño.*

*A mis mejores amigos, que siempre confiaron y creyeron en mí.*

Weimar E. Mantilla G.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto de grado y a todo su personal por el apoyo en el desarrollo del mismo.*

*Al ingeniero Javier Rugeles, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por la colaboración oportuna y la confianza depositada en la realización de este trabajo de grado.*

*A todos mis amigos y compañeros por su amistad y todas aquellas personas que de alguna forma hicieron posible la consecución de esta gran meta personal.*

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>1. BASES TEORICAS</b> .....	<b>20</b>
1.1 MEDICION DE CAUDAL Y TIPOS DE MEDIDORES .....	20
1.1.1 <i>Medición de Caudal</i> .....	20
1.1.2 <i>Tipos de medidores</i> .....	21
1.1.2.1 <i>Másicos tipo coriolis</i> .....	23
1.2 CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS .....	29
1.2.1 <i>Calibración método Gravimétrico</i> .....	31
1.2.2 <i>Calibración método Volumétrico</i> .....	33
1.2.3 <i>Calibración método Medidor Maestro</i> .....	34
1.2.4 <i>Probadores Volumétricos</i> .....	35
1.3 MASAS Y BALANZAS .....	36
1.3.1 <i>Definiciones</i> .....	36
1.3.2 <i>Normas Aplicables</i> .....	37
1.3.3 <i>Clasificación</i> .....	38
1.3.4 <i>Procedimientos de Calibración</i> .....	39
<b>2. MEDICIÓN DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO</b> .....	<b>41</b>
2.1 PRINCIPIO .....	41
2.2 REQUISITOS .....	43
2.3 COMPONENTES PRINCIPALES.....	43
2.3.1 <i>Dispositivo desviador de flujo: DIVERTER</i> .....	43
2.3.2 <i>Sistema de medición del tiempo</i> .....	45
2.3.3 <i>Tanque de pesaje</i> .....	45

2.3.4	<i>Sistema de pesaje</i> .....	46
2.3.5	<i>Línea de Calibración</i> .....	46
2.4	CÁLCULOS.....	47
2.5	INSTALACIONES PARA CALIBRACIÓN EXISTENTES.....	47
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN</b> .....	<b>50</b>
3.1	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CALIBRACION.....	51
3.2	SISTEMA DE CONDUCCION DE FLUJO.....	53
3.2.1	<i>Tuberías de medición</i> .....	53
3.2.2	<i>Acondicionadores de flujo</i> .....	55
3.2.3	<i>Válvulas desviadoras de flujo</i> .....	56
3.2.4	<i>Juntas Flexibles</i> .....	59
3.2.5	<i>Tuberías de Instrumentación y de Conexión</i> .....	60
3.3	SISTEMA DE REFERENCIA.....	62
3.3.1	<i>Tanques de pesaje</i> .....	62
3.3.2	<i>Balanzas</i> .....	63
3.4	SISTEMA DE GENERACIÓN Y REGULACIÓN DE FLUJO.....	67
3.4.1	<i>Tanque de almacenamiento de agua</i> .....	67
3.4.2	<i>Válvulas de regulación</i> .....	68
3.4.3	<i>Sistema de bombeo</i> .....	70
3.4.4	<i>Variadores de frecuencia</i> .....	79
3.5	SISTEMAS AUXILIARES.....	81
3.5.1	<i>Sistema neumático</i> .....	81
3.5.2	<i>Sistema eléctrico</i> .....	83
3.6	INSTRUMENTACIÓN, ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL.....	84
3.6.1	<i>Instrumentación requerida</i> .....	84
3.6.1.1	<i>Presión Manométrica</i> .....	85
3.6.1.2	<i>Presión Absoluta</i> .....	86
3.6.1.3	<i>Temperatura</i> .....	88
3.6.1.4	<i>Humedad</i> .....	89

3.6.2	<i>Plataforma de control y adquisición de datos.....</i>	<i>89</i>
3.7	<b>ESTRUCTURAS Y SOPORTES .....</b>	<b>90</b>
3.7.1	<i>Estructura Principal.....</i>	<i>90</i>
3.7.2	<i>Estructura Sistema de Regulación.....</i>	<i>91</i>
3.7.3	<i>Estructuras Sistemas de Distribución.....</i>	<i>91</i>
3.7.4	<i>Soportes tuberías de medición .....</i>	<i>92</i>
<b>4.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL BANCO .....</b>	<b>96</b>
4.1	ADECUACIONES FÍSICAS Y OBRAS CIVILES.....	96
4.2	MONTAJE CIRCUITO HIDRAULICO .....	98
4.3	MONTAJE SISTEMA DE GENERACIÓN DE FLUJO .....	102
4.4	MONTAJE SISTEMA DE REFERENCIA.....	103
4.5	MONTAJE SISTEMA DE CONTROL.....	104
<b>5.</b>	<b>PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN .....</b>	<b>106</b>
5.1	CALIBRACIÓN DE LAS BALANZAS .....	106
5.2	PRUEBA DE FUGAS .....	108
5.3	FUNCIONAMIENTO Y ALCANCE DEL SISTEMA DE BOMBEO .....	109
5.4	CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR MÁSSICO.....	111
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>114</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>118</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Parámetros asociados a la medición de caudal.....	20
Figura 2. Clasificación general de los medidores de flujo .....	21
Figura 3. Clasificación según la forma de cálculo .....	22
Figura 4. Clasificación según la interacción Fluido - Medidor .....	22
Figura 5. Componentes principales del medidor tipo coriolis .....	23
Figura 6. Señal emitida por cada uno de los pickoff en el medidor.....	25
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del tubo de flujo. ....	25
Figura 8. Deformaciones del tubo de flujo .....	27
Figura 9. Esquema de calibración - método gravimétrico .....	32
Figura 10. Esquema de calibración – método volumétrico .....	34
Figura 11. Esquema de calibración - medidor maestro.....	35
Figura 12. Probador Instalado en campo.....	36
Figura 13. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado por un tanque de nivel constante. ....	41
Figura 14. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado por don tanques de nivel constante. ....	42
Figura 15. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado directamente de bombas.....	42
Figura 16. Ejemplos de diverter. ....	44
Figura 17. Regla operación del diverter.....	45
Figura 18. Diagrama Componentes Principales del Sistema de Calibración .....	50
Figura 19. Diseño de las Tuberías de Medición – CAD .....	54
Figura 20. Diseño del acondicionador de flujo - CAD .....	56
Figura 21. Sistema de Válvulas Desviadoras SVD-1 - CAD .....	57
Figura 22. Sistema de Válvulas Desviadoras SVD-2 - CAD .....	58

Figura 23. Junta de Expansión en Caucho .....	60
Figura 24. Tramos de Instrumentación – a. Aguas Arriba – b. Aguas Abajo .....	61
Figura 25. Línea de Calibración de 3" .....	61
Figura 26. Tanques de Recolección de Agua - CAD .....	63
Figura 27. Sistema de Regulación Manual.- CAD.....	69
Figura 28. Carga Estática y Circuito Hidráulico.....	71
Figura 29. Pérdidas de Presión Escenarios de Calibración .....	74
Figura 30. Comportamiento Bombas Barnes .....	78
Figura 31. Comportamiento Bombas Pedrollo .....	78
Figura 32. Comportamiento Bombas IHM.....	79
Figura 33. Sistema de Bombeo – CAD .....	81
Figura 34. Circuito Neumático.....	82
Figura 35. Circuito Eléctrico .....	83
Figura 36. Plataforma de Control y Adquisición de Datos.....	90
Figura 37. Estructura Principal – CAD .....	92
Figura 38. Estructura de Soporte del SR - CAD.....	93
Figura 39. Estructura de Soporte del SVD-1 – CAD .....	93
Figura 40. Estructura de Soporte del SVD-2 - CAD .....	94
Figura 41. Soporte Tuberías de Medición - CAD .....	94
Figura 42. Banco de Calibración - Modelo CAD .....	95
Figura 43. Adecuación del Área Disponible .....	97
Figura 44. Montaje Tapa del Tanque de Almacenamiento .....	97
Figura 45. Adecuaciones Cuarto de Bombas .....	98
Figura 46. Montaje SVD-1 .....	99
Figura 47. Montaje SVD-2 .....	100
Figura 48. Montaje Sistema de Regulación .....	100
Figura 49. Montaje Tuberías de Medición.....	101
Figura 50. Montaje Manguera Transparente.....	101
Figura 51. Instalación Bombas Centrifugas .....	103
Figura 52. Montaje Sistema Eléctrico .....	103

Figura 53. Montaje Final Sistema de Referencia .....	104
Figura 54. Plataforma de Adquisición de Datos y Control.....	105
Figura 55. Montaje Final Banco de Calibración .....	105
Figura 56. Diagrama de Calibración Balanza 60 Kg .....	106
Figura 57. Diagrama de Calibración Balanza 150 Kg .....	107
Figura 58. Diagrama de Calibración Balanza 1500 Kg .....	108
Figura 59. Prueba Funcionamiento – Línea de Calibración 3" .....	108
Figura 60. Caudal vs Frecuencia - Bomba 6,6 Hp .....	110
Figura 61. Caudal vs Frecuencia - Bomba 20 Hp .....	111
Figura 62. Calibración Medidor Másico CNG50.....	111
Figura 63. Diagrama de Calibración CNG50 .....	113

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diferentes métodos para la calibración de medidores de flujo.....	30
Tabla 2. Clasificación de Instrumentos de Pesaje No Automáticos .....	38
Tabla 3. Errores Máximos Permisibles .....	39
Tabla 4. Máximos Errores para Masas Según su Clase ( $\pm\Delta m$ en mg) .....	40
Tabla 5. Mensurados - método gravimétrico.....	47
Tabla 6. Sistemas de calibración de medidores de líquidos a nivel internacional..	48
Tabla 7. Longitudes Mínimas de Tubería de Medición .....	53
Tabla 8. Características Técnicas Válvulas Mariposa Automáticas.....	59
Tabla 9. Características Técnicas Válvulas Bola Automáticas.....	59
Tabla 10. Características de los Tanques de Recolección de Agua .....	62
Tabla 11. Características de Sistema de Referencia .....	63
Tabla 12. Preselección Balanzas 1500 Kg .....	64
Tabla 13. Rangos de operación y Errores máximos permitidos.....	65
Tabla 14. Características de las Balanzas BLZ3 .....	66
Tabla 15. Características del terminal de pesaje .....	66
Tabla 16. Características geométricas del tanque de almacenamiento de agua...	67
Tabla 17. Características Técnicas Válvulas de Regulación .....	69
Tabla 18. Selección Bombas Centrifugas .....	77
Tabla 19. Selección Variadores de Frecuencia .....	80
Tabla 20. Especificaciones Unidad de Mantenimiento Chelic NBC-300-A .....	82
Tabla 21. Listado de Instrumentación Requerida.....	85
Tabla 22. Selección Instrumentos de Presión Manométrica .....	86
Tabla 23. Selección Instrumentos de Presión Absoluta.....	87
Tabla 24. Contribución de la densidad del aire en el mensurado .....	87
Tabla 25. Selección Instrumentos de Temperatura .....	88

Tabla 26. Selección Instrumento de Humedad .....	89
Tabla 27. Variación de Caudal Respecto a la Variación de Frecuencia .....	110
Tabla 28. Condiciones Ambientales y de Operación dela Prueba .....	112
Tabla 29. Resultados de Calibración CNG50 .....	112

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR MÁSI TIPO CORIOLIS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO .....	118
ANEXO B. PLANOS GENERALES.....	123

## RESUMEN

### TITULO:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDAL TIPO CORIOLIS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO\***

### AUTOR:

**WEIMAR EDUARDO MANTILLA GUTIÉRREZ†**

### PALABRAS CLAVES:

Calibración, Gravimétrico, Coriolis, Caudal

### DESCRIPCIÓN:

Este proyecto tiene el objetivo de seguir fortaleciendo la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Corporación CDT de GAS en los conocimientos sobre la medición de caudal de fluidos líquidos, por medio del desarrollo de una infraestructura metrológica destinada a la calibración de medidores másicos tipo coriolis, con el apoyo de COLCIENCIAS.

En Colombia y el mundo, en los últimos años se ha incrementado el uso de estos medidores, en razón a las ventajas que ofrecen respecto a las tecnologías convencionales y a su versatilidad para realizar mediciones de masa y volumen de fluidos líquidos y gaseosos. Brindar trazabilidad y confiabilidad a las mediciones realizadas por estos instrumentos es de vital importancia para el sector industrial que los emplea, pero en la medición de caudal, no existen dispositivos patrones o artefactos que físicamente reproduzcan la magnitud en cuestión, a diferencia de las mediciones de longitud o masa. Por tal motivo, los patrones de flujo deben derivarse a partir de mediciones relacionadas a patrones de magnitudes fundamentales, como longitud, masa, tiempo y temperatura con trazabilidades definidas.

El contenido de este libro presenta en primer lugar la descripción del proceso de medición de caudal por el método gravimétrico estático, considerado uno de los más exactos por su baja incertidumbre. Seguidamente se muestra el diseño del banco basado en dicho método, con las consideraciones de diseño y de selección de equipos tenidas en cuenta, para finalmente realizar el proceso de fabricación y adquisición de componentes, con el fin de construir esta facilidad metrológica.

Como resultado se obtuvo una infraestructura destinada a la calibración de medidores másicos tipo coriolis, en tamaños desde 1/2" hasta 3" en un rango de caudales de 1 a 1400 L/min, con bajos niveles de incertidumbre asociada al proceso de medición, ubicada en las instalaciones del CDT de GAS.

---

\* Proyecto de Grado

† Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Javier Rugeles, Codirector José Augusto Fuentes.

## ABSTRACT

**TITLE:**

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BENCH FOR CORIOLIS FLOW METER CALIBRATION BY GRAVIMETRIC STATIC METHOD.\***

**AUTHOR:**

**WEIMAR EDUARDO MANTILLA GUTIERREZ †**

**KEY WORDS**

Calibration, Gravimetric Method, Coriolis, Flow

**DESCRIPTION:**

The objective of this project is to continue strengthening the school of Mechanical Engineering and CDT de GAS Corporation in the knowledge of flow measurement of liquids, through the development of a metrological infrastructure for calibration of coriolis flow meters, with COLCIENCIAS support.

In Colombia and the world, in the recent years the use of these meters has increased, due to the advantages over conventional technologies and versatility for measuring mass and volume of liquids and gases.

Provide traceability and reliability to measurements made by these instruments is important for the industries which use them, but in the flow measurement, there are not standard devices that could physically reproduce the magnitude, unlike measurements of length or mass. Therefore, the flow patterns should be achieved from measurements related to standards of fundamental quantities such as length, mass, time and temperature with defined traceability.

At the beginning, this book presents the description of flow measurement by the static gravimetric method which is considered one the most accurate due to its low uncertainty. Below is a design of the bench based in this method, with the design and equipment selection considerations taken into account, to finally perform the process of manufacturing and purchase of components to build it.

As result, an infrastructure for the calibration of coriolis flow meters, featuring sizes from ½” to 3”, a flow range from 1 to 1400 L/min, with low levels of uncertainty, located on the premises of CDT de GAS was obtained.

---

\* Graduation Project

† Faculty of Physics-Mechanic Engineering, Mechanic Engineering School, Director Javier Rugeles

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la competitividad de las empresas se soporta en la calidad de sus productos y la efectividad de sus procesos, lo cual se encuentra directamente relacionado con la necesidad de medir magnitudes físicas y/o químicas presentes en sus líneas productivas.

Realizar mediciones confiables, además de asegurar la calidad de un producto y generar competencia en el sector productivo, sirve para impulsar el desarrollo científico y tecnológico que permite mejorar la calidad de vida del ser humano. Lo anterior justifica y deja al descubierto la importancia de la existencia de una infraestructura metrológica adecuada, la cual permita brindar trazabilidad a las mediciones y garantizar la confiabilidad en las mismas.

En el campo de los hidrocarburos y en términos de la transferencia de custodia<sup>1</sup>, los medidores de flujo han sido definidos en muchos casos como las cajas registradoras de una empresa o país, y si ésta se encuentra mal calibrada, afecta sin duda la equidad de la transacción entre las partes involucradas, generando pérdidas económicas significativas para algún actor del intercambio y grandes problemas legales.

Además, el avance de la tecnología en el mundo, se hace presente en las mediciones, y como caso específico, no podría dejar de lado la medición de flujo de fluidos. En Colombia y el mundo, en los últimos años se incrementa el uso de medidores másicos tipo Coriolis, en razón a las ventajas que ofrecen respecto a las tecnologías convencionales y su versatilidad para realizar mediciones de masa y volumen de fluidos líquidos y gaseosos. Estos medidores tipo Coriolis han

---

<sup>1</sup> La medición de transferencia de custodia de fluidos es el tipo de medición que está asociado con la compra, venta y pago de impuestos de un producto determinado. El propósito de la medición de transferencia de custodia de fluidos es llevar a cabo mediciones con la mas mínima cantidad de error.

encontrado numerosas aplicaciones por ser una tecnología robusta que además permite variaciones moderadas en la propiedades del fluido, sin disminuir su desempeño metrológico.

Teniendo en cuenta lo anterior, y siendo conscientes de la vital importancia que reviste la metrología de fluidos líquidos y el aseguramiento metrológico de los procesos de medición en industrias, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas – CDT de Gas – La Universidad Industrial de Santander – UIS - y en su nombre la Escuela de Ingeniería Mecánica, desarrollaron un proyecto para apoyar parte del sector industrial, garantizando transparencia y confianza en las mediciones de este sector, y además para fortalecer la infraestructura metrológica del país y ampliar los conocimientos sobre la medición de flujo de fluidos.

El proyecto consintió en diseñar y construir un banco para calibración de medidores tipo coriolis por el método gravimétrico estático, teniendo como guía principalmente la norma ISO 4185-1980, con una capacidad para calibrar medidores en un rango de 1 L/min a 1400 L/min con niveles de incertidumbre estándar como máximo de 0.1%.

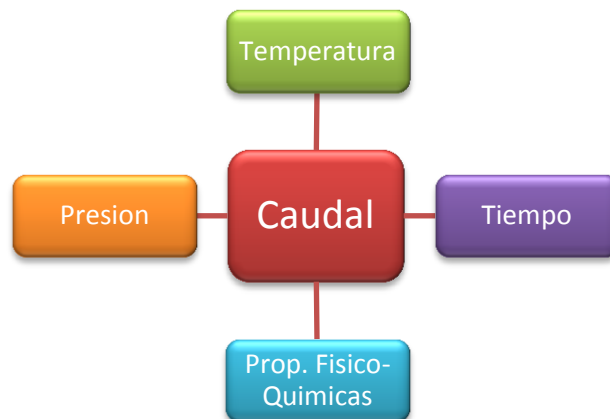
## 1. BASES TEORICAS

### 1.1 MEDICION DE CAUDAL Y TIPOS DE MEDIDORES

#### 1.1.1 Medición de Caudal

En comparación con otras magnitudes (masa, temperatura, presión, etc.) el flujo es una de las más complejas de medir, por ser una magnitud derivada que representa un fenómeno dinámico, donde generalmente los principios físicos en los que se fundamenta su medición, conllevan a la aplicación de relaciones matemáticas que involucran diferentes variables para obtener el resultado. Por esta razón, la medida de flujo esté sujeta a altos niveles de incertidumbres y error, ya que la determinación de cada uno de los valores de las magnitudes involucradas acarrea su propia incertidumbre y error.

Figura 1. Parámetros asociados a la medición de caudal



Fuente: El Autor

Otro aspecto que hace de la medida de flujo un proceso complejo, es la gran variedad de fluidos y rangos de medida encontrados en la industria. No existe un medidor que pueda cubrir todas las aplicaciones. La correcta selección y empleo

de medidores de volumen y caudal de fluidos es una ciencia y un arte que requiere un conocimiento claro de los principios de operación de cada técnica de medida, sus ventajas, desventajas, alcances, incertidumbres asociadas y condiciones de instalación, entre otros.

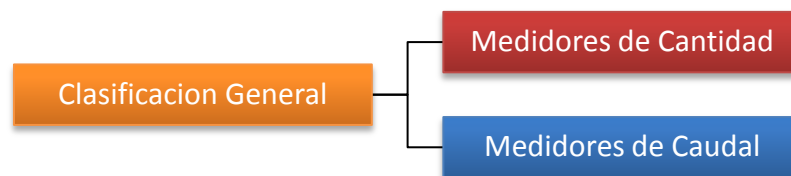
La medición de caudal puede referirse a cualquiera de los seis tipos de medición encontrados comúnmente.

- ✚ Medición de velocidad puntual [ $v$ ]
- ✚ Medición de velocidad media en tuberías [ $v$ ]
- ✚ Medición del caudal volumétrico [ $V$ ]
- ✚ Medición de volumen total [ $V$ ]
- ✚ Medición del caudal másico [ $m$ ]
- ✚ Medición de la masa total [ $m$ ]

### 1.1.2 Tipos de medidores

Los medidores de caudal han sido clasificados de diversas formas<sup>2</sup>: En el sistema de clasificación más general, de acuerdo al tipo magnitud que entregan, los medidores se agrupan en medidores de cantidad (totalizadores) y medidores de caudal (*Figura 2*).

Figura 2. Clasificación general de los medidores de flujo



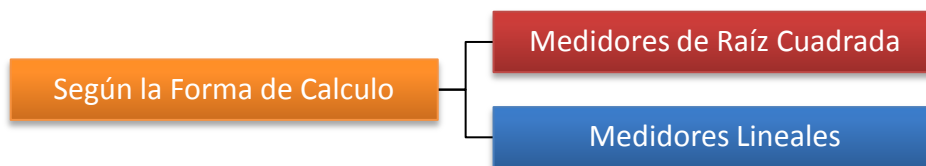
Fuente: El Autor.

---

<sup>2</sup> MILLER. Richard W. Flow Measurement Engineering Handbook. 3rd ed. McGraw Hill .Washington, D.C.: 1996. P 1.4-1.5.

Según la presentación formal de la expresión matemática del cálculo del caudal o el volumen total del fluido, los medidores se clasifican en: medidores de raíz cuadrada (generadores de presión diferencial) y medidores lineales (*Figura 3*). Esta clasificación provee el mismo modelo matemático para todos los medidores en cada grupo y evita la confusión en los cálculos de volumen y caudal de fluido.

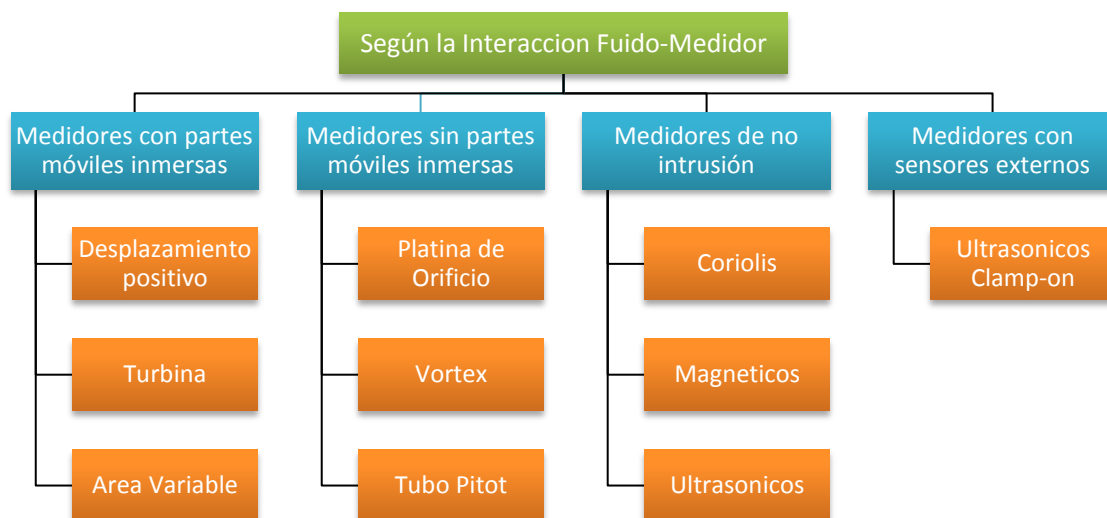
Figura 3. Clasificación según la forma de cálculo



Fuente: El Autor.

Una clasificación más particular es aquella que divide las técnicas de medición de flujo en cuatro categorías, dependiendo de la interacción del medidor con el fluido objeto de medición, como se aprecia en la *Figura 4*.

Figura 4. Clasificación según la interacción Fluido - Medidor



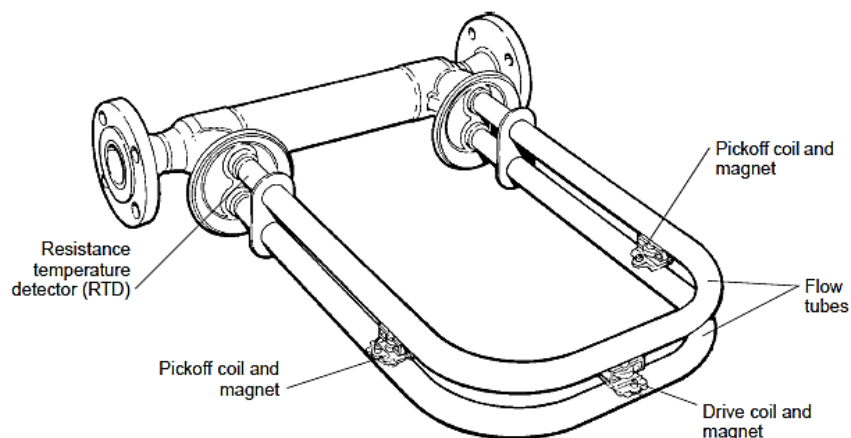
Fuente: Corporación CDT de GAS.

### 1.1.2.1 Másicos tipo coriolis

Un medidor másico tipo coriolis consiste de un sensor mecánico y un transmisor electrónico; los componentes del sensor primario son los tubos de flujo vibrantes (*Flow tubes*), el oscilador (*Drive Coil*) y los detectores de posición (*Pickoff*), siendo estos últimos los que proporcionan la señal desde la cual el flujo másico puede ser determinado<sup>3</sup> (*Figura 5*).

Además estos medidores pueden evaluar la densidad, la cual es independiente de la medición del flujo másico, y es obtenida a partir de los tubos de flujo vibrantes. Al tener entonces, la capacidad de determinar la masa y la densidad, estos medidores calculan también el flujo volumétrico.

Figura 5. Componentes principales del medidor tipo coriolis



Fuente: MICRO MOTION INC. Proving Coriolis Flow meters

La fuerza coriolis descrita por el matemático francés Gaspard-Gustave Coriolis es el principio fundamental de operación detrás de un medidor másico tipo coriolis. Esta es una fuerza inercial, perpendicular a la dirección de un cuerpo en

<sup>3</sup> Micro Motion Inc. "Proving Coriolis Flow meters". Washington, D.C.: 1998, p 3-5.

movimiento, que se desplaza linealmente en un sistema con rotación uniforme y al eje de rotación del mismo sistema; dicha fuerza produce un movimiento de deflexión en la trayectoria del objeto, si esta es vista desde un observador ubicado sobre el mismo régimen de rotación.

<sup>4</sup>La generación de la fuerza de Coriolis para el caso de los medidores se basa en la inversión de las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de omega ( $\Omega$ ) en estado de vibración controlada, a la frecuencia de resonancia para reducir la energía requerida a través del uso de dispositivos electromagnéticos.

La vibración del bucle, perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza en la entrada del fluido y una fuerza en sentido contrario en la de salida, con lo que se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración.

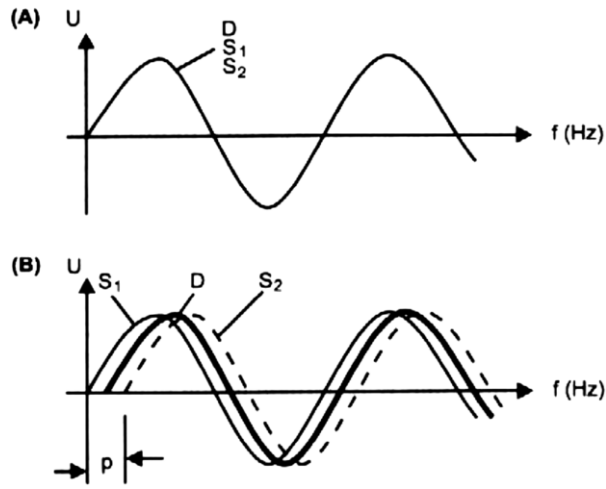
El movimiento de cualquier punto del tubo representa una onda sinusoidal. Sin flujo a través del tubo, todos los puntos se mueven en secuencia o en fase con el controlador (*Figura 6-a*). Con flujo a través del tubo, el movimiento del lado de entrada del tubo se retrasa con respecto a la fase del controlador, y el movimiento del lado de salida se adelanta a la fase del controlador (*Figura 6-b*). El retardo entre los tiempos  $S1$  y  $S2$  es directamente proporcional al caudal de masa a través del sensor.

Examinando nuevamente un tubo de flujo en forma de “U” (*Figura 7*) se plantea la ecuación base que aplica a ésta estructura. La *Figura 7* muestra un fluido con masa  $m$  desplazándose con una velocidad  $V$  a través de un tubo en forma de “U” oscilando con una velocidad angular  $\omega$  alrededor del eje O-O.

---

<sup>4</sup> TAPIAS, Erik S. Tecnologías claves para medición de fluidos en transferencia de custodia: Medidores Másicos. Memorias Corporación CDT de GAS, 2011. 23 p

Figura 6. Señal emitida por cada uno de los pickoff en el medidor.



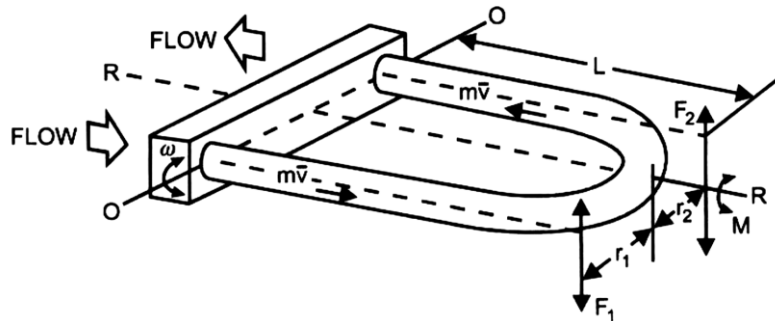
Fuente: Corporacion CDT de GAS.

La fuerza de Coriolis inducida por el flujo es descrita por la siguiente ecuación:

$$F = 2 * m * \omega * v \quad \text{Ecuación 1}$$

En la cual  $F$  (fuerza),  $\omega$  (su velocidad angular) y  $v$  (velocidad lineal) son vectores y  $m$  es la masa para ubicar un punto conocido a una distancia  $L$  del eje  $O-O$ .

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del tubo de flujo.



Fuente: Corporacion CDT de GAS

Los vectores para la entrada y salida del fluido están en dirección opuesta. Mirando el tubo de medición a lo largo del eje  $R-R$ , las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  ejercidas por el fluido sobre las conexiones de entrada y salida están en dirección opuesta pero tienen la misma magnitud.

Dado que el tubo oscila alrededor del eje  $O-O$ , las fuerzas desarrolladas crean un momento de oscilación  $M$  alrededor del eje  $R-R$ , con un radio  $r$ . Esto se expresa como:

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Puesto que  $F_1 = F_2$  y  $r_1 = r_2$ , reemplazando la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

$$M = 2Fr = 4mv\omega r \quad \text{Ecuación 3}$$

La velocidad es definida como unidad de longitud  $L$  por unidad de tiempo  $t$ . El caudal másico  $W$  es definido como la masa que fluye en un punto por unidad de tiempo. Por consiguiente:

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$W = \frac{m}{t} \quad \text{Ecuación 5}$$

De este modo, por sustitución de  $W = \frac{mv}{L}$ , en el cual  $L$  es la longitud del tubo, La Ecuación 3 se convierte en:

$$M = 4\omega rWL \quad \text{Ecuación 6}$$

El momento  $M$  induce una deflexión angular, giro ( $\theta$ ), del tubo de medición alrededor del eje  $R-R$ . El giro es máximo en la mitad del desplazamiento vibratorio del tubo. (Figura 7).

No obstante, la deflexión causada por el momento es opuesta a la fuerza  $K$  correspondiente al módulo de elasticidad del tubo. En general, para un resorte sujeto a un momento de torsión, el torque es definido por:

$$T = K\theta \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $T=M$ , el caudal másico  $W$  puede ahora relacionarse con el ángulo de giro  $\theta$  usando la *Ecuación 6*:

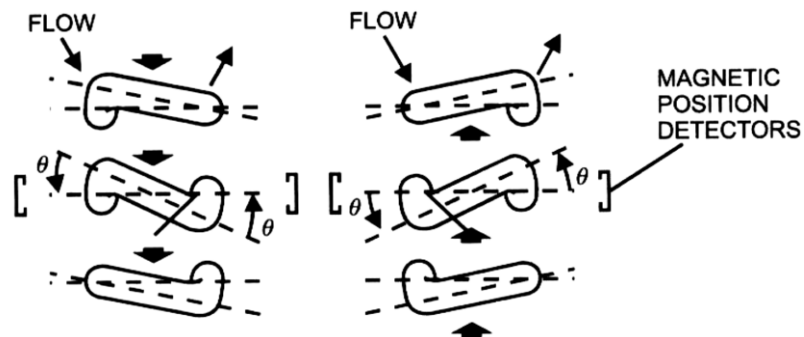
$$W = \frac{K\theta}{4wrL} \quad \text{Ecuación 8}$$

El caudal másico puede derivarse a partir de la deflexión angular, medida con dos sensores de posición magnéticos. (*Figura 8*).

Cada sensor usa un método de procesamiento de señales para medir  $\theta$  como una función del tiempo que le toma a cada tramo del tubo cruzar el punto medio del desplazamiento, correspondiente a la deflexión máxima.

La diferencia de tiempo entre los dos tramos es cero (0) para una condición sin flujo. Cuando se establece un flujo (*incrementa el ángulo  $\theta$* ) el diferencial de tiempo entre las señales correspondientes a los extremos del desplazamiento de los tramos del tubo también se incrementan. Estos diferenciales de tiempo son interpretados como pulsos de diferente longitud por el circuito lógico digital.

Figura 8. Deformaciones del tubo de flujo



Fuente: Corporacion CDT de GAS

La velocidad  $v_t$  del tubo en la mitad de su desplazamiento, multiplicada por el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ), está relacionado con  $\theta$  por la siguiente ecuación:

$$\sin \theta = \frac{v_t \Delta t}{2r} \quad \text{Ecuación 9}$$

Si el valor del ángulo  $\theta$  es pequeño, puede asumirse que  $\theta$  es igual a  $\sin(\theta)$ . Y, para una rotación angular pequeña,  $v_t$  es igual al producto de  $\omega$  por la longitud  $L$  del tubo.

De esta manera, si  $\sin(\theta) = \theta$  y  $v_t = \omega L$ , la *Ecuación 9* se expresa de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{\omega L \Delta t}{2r} \quad \text{Ecuación 10}$$

Combinando la *Ecuación 8* y la *Ecuación 10*, se obtiene que:

$$W = \frac{K \omega L \Delta t}{8r^2 \omega L} \quad \text{Ecuación 11}$$

Por consiguiente, el caudal másico es proporcional únicamente al intervalo de tiempo  $\Delta t$  (*microsegundos*) y a algunas constantes geométricas. Además es independiente de  $\omega$  y, por lo tanto, independiente de la frecuencia de vibración del tubo de medición.

$$W = k * \Delta t \quad \text{Ecuación 12}$$

El término  $K$  en la ecuación 11 representa el módulo de elasticidad del tubo. Este modulo varía como una función de la temperatura en todos los metales, lo que obliga a realizar compensaciones por cambios de temperatura que ocurran en el proceso. Comúnmente, la temperatura superficial del tubo de flujo es monitoreada utilizando un sensor de temperatura tipo RTD. Con los cambios de temperatura, la electrónica que procesa las señales y ajusta continuamente la constante de proporcionalidad  $k$  de la ecuación 12, al mismo tiempo que escala el  $\Delta t$  para obtener la medición de caudal másico corregida.

La medición de caudal másico en los medidores basados en el método Coriolis presentan las siguientes características.

*Ventajas:*

Es Independiente de la temperatura, la presión, la viscosidad y la densidad del fluido. Además es insensible a los cambios en el perfil de velocidad del flujo, por lo que no requiere tramos rectos de entrada y salida.

*Desventajas:*

Pueden afectar la medición de estos dispositivos los esfuerzos sobre el cuerpo de medidor por efectos de instalación, vibraciones externas cercanas a la frecuencia de operación, flujo pulsante y suciedad en la tubería.

La selección del material del tubo es importante puesto que debe soportar la fatiga mecánica debida a la vibración a su frecuencia natural, la corrosión y la erosión del fluido. En condiciones adecuadas de operación y aseguramiento metrológico estos dispositivos pueden medir con incertidumbres dentro del  $\pm 0.2\%$ .

La norma API 5.6<sup>5</sup> describe los métodos para alcanzar los niveles de exactitud en procesos de transferencia de custodia usando medidores másicos Coriolis cuando estos son usados para la medición de hidrocarburos líquidos.

## **1.2 CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS**

Calibración se define como la operación que bajo condiciones específicas establece, una relación entre los valores de los patrones de medición con sus

---

<sup>5</sup> Manual of Petroleum Measurement Standards. "Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters". Chapter 5 – Section 6. 2002.

incertidumbres de medida asociada, y las correspondientes indicaciones de un instrumento de medición o sistema de medición, con sus incertidumbres asociadas<sup>6</sup>.

En la medición de flujo, no existen dispositivos patrones o artefactos que físicamente reproduzcan directamente la magnitud en cuestión, a diferencia de las mediciones de longitud o masa. Por tal motivo, los patrones de flujo deben derivarse a partir de mediciones relacionadas a patrones de magnitudes fundamentales, como longitud, masa, tiempo y temperatura trazables a patrones establecidos. En tabla 1 se listan los métodos más usados en la calibración de medidores de flujo y su trazabilidad.

Además de la incertidumbre y de la cadena de trazabilidad que se puede lograr con cada método, tanto el sistema de calibración por el método gravimétrico como el volumétrico, demandan instalaciones de alta precisión que brinden óptimas condiciones para la calibración de los medidores de flujo.

Tabla 1. Diferentes métodos para la calibración de medidores de flujo.

<b>Método de Prueba</b>	<b>Estándar de referencia</b>	<b>Tipo de Estándar</b>
<b>Gravimétrico (sistema de pesaje)</b>	Certificado de pesas	Primaria
<b>Comparación volumétrica</b>	Pesas y densidad o Patrón volumétrico.	Secundario
<b>Probadores Volumétricos *</b>	Patrón volumétrico de trabajo.	Secundario o de trabajo
<b>Medidores maestros. *</b>	Gravimétrico o Comparación volumétrica	Secundario o de trabajo

\* Usados generalmente en calibraciones In-Situ

Fuente: El Autor.

<sup>6</sup> BIPM. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3<sup>rd</sup> Edition. 2012.

La Norma ISO 4185<sup>7</sup> y la Norma ISO 8316<sup>8</sup>, especifican las características y los requisitos básicos para el método gravimétrico y volumétrico respectivamente. Por otra parte, el API 4.5<sup>9</sup> y API 4.2<sup>10</sup> presentan la guía de diseño, instalación, calibración y operación de sistemas probadores usados en la industria del petróleo. A continuación se describe en detalle cada uno de los métodos.

### 1.2.1 Calibración método Gravimétrico

Este método de calibración requiere de un sistema de pesaje (balanza, celdas de carga, etc.) para determinar la cantidad en masa de líquido (generalmente agua) que fluye a través del medidor (*Figura 9*). Según el principio de operación, el sistema de calibración gravimétrico se puede clasificar en dos, dependiendo del método de pesaje empleado:

**Método de pesaje estático:** El método determina la cantidad de masa de líquido entregada durante un tiempo determinado, donde la masa neta se deduce de la diferencia de la tara al inicio de la prueba y del pesaje después de almacenar el fluido. Debido a que la entrega de líquido no es constante, se usa una válvula desviadora de flujo para garantizar la estabilidad del flujo.

**Método de pesaje dinámico:** Este método, al igual que el anterior, determina la cantidad de masa de líquido entregada durante un tiempo determinado pero con la diferencia que la entrega de fluido es constante, garantizando de esta manera un flujo estable. La masa neta acumulada se deduce de la diferencia de masa entre dos instantes de tiempo previamente determinados. La desventaja de este método

---

<sup>7</sup> International Standard ISO 4185 "Measurement of Liquid Flow in Close Conduits - Weighing Method". Geneva: ISO, 1980/Cor 1:1993. 26 p.

<sup>8</sup> International Standard ISO 8316 "Measurement of liquid flow in closed conduit –method by collection of the liquid in a volumetric tank". Geneva: ISO, 1987. 21 p.

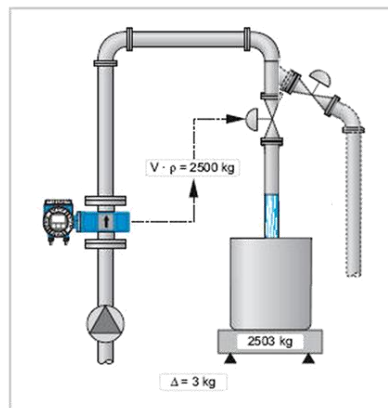
<sup>9</sup> Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 4 "Proving Systems". – Section 5 "Master Meters Provers". May 2000.

<sup>10</sup> Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 4 "Proving Systems" – Section 2 "Displacement Provers". Sep 2003

radica en los efectos dinámicos que pueden producirse durante el proceso de calibración, los cuales se incrementan si la resolución del instrumento de pesaje es alta.

Si el medidor está configurado para la medición de volumen, se realiza la respectiva medición del flujo másico del medidor y las mediciones de densidad del fluido de calibración para inferir matemáticamente el flujo volumétrico.

Figura 9. Esquema de calibración - método gravimétrico



Fuente: <http://www.flowtec.endress.com>

El método gravimétrico estático es el método más recomendado por los estándares internacionales para la calibración de medidores de flujo por brindar alta precisión en la medición e incertidumbres menores de  $\pm 0,1 \%$  (con un 95% de confiabilidad), cuando la instalación es cuidadosamente construida, mantenida y usada.

Es así como el Centro nacional de metrología de México - CENAM dispone de un patrón nacional de flujo de líquidos fundamentado en el método gravimétrico estático, con el cual reporta incertidumbres relativas de  $\pm 0,03\%$  a  $\pm 0,05\%$  para

flujo másico y  $\pm 0,05\%$  a  $\pm 0,1\%$  para flujo volumétrico con un nivel de confianza aproximado de 95%<sup>11</sup>.

### 1.2.2 Calibración método Volumétrico

El método de comparación volumétrica, compara del volumen indicado en un patrón volumétrico contra el volumen indicado en el medidor; expresados a condiciones estándar (*Figura 10*). En la medición de volumen de flujo líquido se puede encontrar la medición estática y la medición dinámica.

**Medición estática o método de transferencia:** determina del volumen contenido o entregado por una medida volumétrica a una temperatura de referencia, mediante el volumen contenido o entregado de una medida volumétrica patrón. Estas medidas volumétricas patrón son empleadas normalmente como referencia para la calibración de medidores de volumen o bien de recipientes volumétricos de mayor capacidad. A su vez, son calibrados por patrones volumétricos de mejores características metrológicas.

**Medición dinámica:** determina el factor de corrección del medidor al comparar el volumen conocido de la medida volumétrica (recipiente aforado – Serafín) contra el volumen indicado por el medidor. El Serafín se instala en serie con el medidor en prueba.

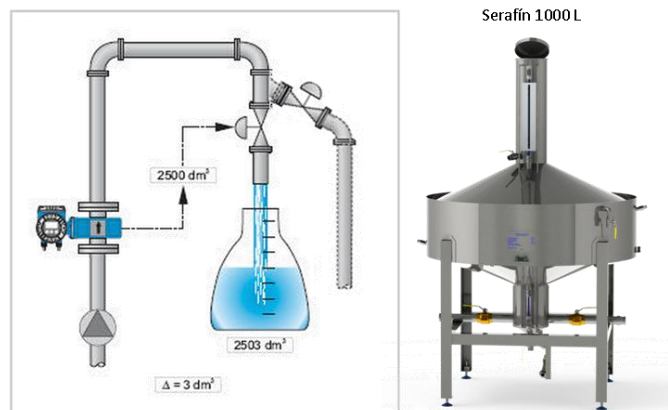
Estos tanques aforados son calibrados por otros medidores volumétricos de menor capacidad y mejores características metrológicas o en intervalos de tiempo mayores a los especificados por las balanzas de alta presión exigidas por el método gravimétrico. Los rangos de caudal en los sistemas que utilicen este método, dependen de la cantidad y capacidad de serafines que tengan a disposición, los cuales deben encontrarse bajo condiciones controladas.

---

<sup>11</sup> Loza, A. "La Metrología de flujo de líquidos en México". XV Seminario y II encuentro Nacionales de Metrología y Normalización para la industria la Educación. CENAM.

Si el medidor es configurado para medición de masa, la densidad del fluido de prueba debe ser necesariamente medida, por medio de densímetros a frecuencia o ensayos de laboratorio y así poder determinar mediante cálculos la masa del fluido. Adicionalmente es necesario tener la medición de la temperatura del recipiente con el fin de corregir el volumen por el error que introduce la expansión térmica del material.

Figura 10. Esquema de calibración – método volumétrico



Fuente: <http://www.flowtec.endress.com>

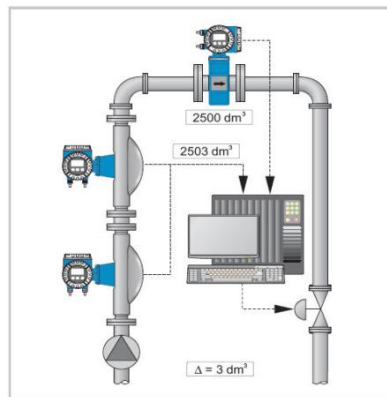
El método volumétrico puede ser considerado después del método gravimétrico, como uno de los más precisos de los métodos de medición de flujo volumétrico. Por esta razón es frecuente utilizado como método estándar de calibración. Cuando la instalación es correctamente construida, montada y usada es posible obtener incertidumbres de  $\pm 0,1$  a  $\pm 0,2\%$  (con 95% de confiabilidad).

### 1.2.3 Calibración método Medidor Maestro

Este sistema utiliza como patrón un medidor con tecnología similar al medidor en prueba. El medidor patrón es instalado en serie con el medidor en prueba. El

método consiste en la realización de mediciones simultáneas totalizando la cantidad de fluido que pasa a través tanto del medidor patrón como del medidor en prueba. El medidor empleado como patrón debe poseer características metrológicas superiores (exactitud e incertidumbre), también debe contar con una cadena de trazabilidad definida, con este método se pueden lograr incertidumbres de  $\pm 0,08$  a  $\pm 0,1\%$  (con 95% de confiabilidad) en masa<sup>12</sup>.

Figura 11. Esquema de calibración - medidor maestro.



Fuente: <http://www.flowtec.endress.com>

#### 1.2.4 Probadores Volumétricos

Todos los tipos de sistemas de desplazamiento conocidos como Probadores Volumétricos funcionan según el principio del desplazamiento repetible de un volumen conocido de líquido desde una sección calibrada de tubería que se encuentra limitada por dos detectores. El desplazamiento del volumen de líquido se consigue por una esfera con un diámetro ligeramente menor al diámetro de la tubería o por desplazamiento de un pistón a través de la tubería. Un volumen correspondiente de líquido se mide simultáneamente por el medidor en calibración

<sup>12</sup><http://www.flowtec.endress.com/eh/pc/flowtec/en/home.nsf/#page/id/FDD2705DF3D8E296C1257788007E563F>

que se encuentra instalado en serie con el Probador. Con este método se pueden lograr incertidumbres de  $\pm 0,06$  (con 95% de confiabilidad) en masa<sup>13</sup>.

Figura 12. Probador Instalado en campo.



Fuente: Loza. Alejandro. "Memorias Curso Calibración de Probadores"

## 1.3 MASAS Y BALANZAS

### 1.3.1 Definiciones

- ✚ Instrumento de pesaje no automático: Instrumentos que requieren la intervención de un operador durante el proceso de pesaje, para decidir que el resultado del pesaje es aceptable.
- ✚ Escala de verificación (e): Valor, expresado en unidades de masa, usado para la clasificación y verificación de un instrumento. Representa la exactitud absoluta.
- ✚ Número de intervalo de escala de verificación: Cociente de la máxima capacidad y el intervalo de escala de verificación, representa la exactitud relativa y se expresa matemáticamente como:

---

<sup>13</sup> CENAM. "Guía Técnica Sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la Calibración de Medidores de Flujo de Líquidos Empleando Como Referencia un Patrón Volumétrico". Revisión 1. Abril de 2008.

$$n = \frac{Max}{e} \quad \text{Ecuación 13}$$

- ✚ Capacidad mínima: Valor de la carga debajo del cual los resultados están sujetos a un excesivo error relativo.
- ✚ Error máximo permisible: Diferencia máxima, positiva o negativa, permitida por la regulación entre la indicación de un instrumento y el correspondiente valor verdadero.

### 1.3.2 Normas Aplicables.

Las normas más importantes y más completas, tomadas como referencia para el desarrollo de procedimientos de calibración, son las publicadas por OIML, por tratarse de recomendaciones enfocadas hacia metrología legal.

Las recomendaciones mencionadas están identificadas como: OIML R76 para instrumentos de pesaje y OIML R111 para masas. A continuación se presenta una descripción de cada una de ellas.

- ✚ *OIML R76 (Instrumentos de pesaje no automáticos - Requerimientos técnicos y metrológicos – Pruebas – 1992)*: Esta recomendación especifica los requerimientos técnicos y metrológicos para instrumentos de pesaje no automáticos sujetos a controles metrológicos oficiales. Los requerimientos aplican a los instrumentos independientemente del principio de medición. También especifica las pruebas que deben realizarse para la calibración y verificación metrológica de instrumentos de pesaje.

El equivalente nacional para la OIML R76 es la NTC 2031 (Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático - Requisitos Metrológicos y Técnicos) publicada por ICONTEC.

- ✚ *OIML R111 (Pesas de clases E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 y M3 - 2004)*: Esta recomendación contiene los requerimientos técnicos y

metrológicos para masas utilizadas en la verificación de instrumentos de pesaje, la verificación o calibración de masas. También especifica las pruebas que deben realizarse para la calibración y verificación metrológica de masas.

El equivalente nacional de la recomendación R111 es la NTC 1848 (Pesas de Precisión E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3) publicada por ICONTEC.

### 1.3.3 Clasificación

Los instrumentos de pesaje según OIML R76, son clasificados en clases de exactitud (*Tabla 2*), de acuerdo a la escala de verificación y el número de intervalos de escala de verificación; la mínima capacidad queda determinada dependiendo de la clase del instrumento.

Tabla 2. Clasificación de Instrumentos de Pesaje No Automáticos

Accuracy class	Verification scale interval, $e$	Number of verification scale intervals, $n = \text{Max}/e$		Minimum capacity, Min (Lower limit)
		minimum	maximum	
Special (I)	$0.001 \text{ g} \leq e^*$	50 000**	–	$100 e$
High (II)	$0.001 \text{ g} \leq e \leq 0.05 \text{ g}$	100	100 000	$20 e$
	$0.1 \text{ g} \leq e$	5 000	100 000	$50 e$
Medium (III)	$0.1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$	100	10 000	$20 e$
	$5 \text{ g} \leq e$	500	10 000	$20 e$
Ordinary (III)	$5 \text{ g} \leq e$	100	1 000	$10 e$

Fuente: OIML R76-1

Los errores máximos permisibles son también determinados dependiendo la clase de exactitud del instrumento de pesaje y para la verificación inicial son determinados según la *Tabla 3*.

Tabla 3. Errores Máximos Permisibles

Maximum permissible errors on initial verification	For loads, $m$ , expressed in verification scale intervals, $e$			
	Class I	Class II	Class III	Class III
$\pm 0.5 e$	$0 \leq m \leq 50\,000$	$0 \leq m \leq 5\,000$	$0 \leq m \leq 500$	$0 \leq m \leq 50$
$\pm 1.0 e$	$50\,000 < m \leq 200\,000$	$5\,000 < m \leq 20\,000$	$500 < m \leq 2\,000$	$50 < m \leq 200$
$\pm 1.5 e$	$200\,000 < m$	$20\,000 < m \leq 100\,000$	$2\,000 < m \leq 10\,000$	$200 < m \leq 1\,000$

Fuente: OIML R76-1

*Masas:* Los valores nominales de las pesas se encuentran en múltiplos de 1, 2 y 5. Su forma depende de la masa que representen como se describe a continuación:

- ✚ Alambre:  $m \leq 1$  [g]
- ✚ Cilíndricas:  $1$  [g]  $\leq m < 10$  [Kg]
- ✚ Bloque:  $m \geq 10$  [Kg]

La clasificación de las masas según OIML R111, está basada en el máximo error permisible como lo muestra la Tabla 4.

### 1.3.4 Procedimientos de Calibración

En la calibración de instrumentos de pesaje, se realizan una serie de pruebas al instrumento con el fin de evaluar diferentes características metrológicas. Las pruebas a realizar se definen a continuación:

- ✚ *Prueba de exactitud:* El objetivo de la prueba de exactitud es la determinación del error en la indicación del instrumento de pesaje. Se realizan pruebas de ascenso y descenso de carga.
- ✚ *Prueba de repetibilidad:* El objetivo de esta prueba es evaluar la variabilidad de la indicación del instrumento como resultado de varias mediciones de una misma carga. Se realizan varios puntos de prueba en el rango del instrumento.

- ✚ *Prueba de excentricidad de carga:* Esta prueba permite determinar el error del instrumento para diferentes posiciones de carga sobre el instrumento de pesaje.
- ✚ *Prueba de movilidad:* Esta prueba permite determinar la respuesta del instrumento de pesaje a pequeñas variaciones de carga, generalmente en una división de escala.
- ✚ *Prueba de variación de la indicación con el tiempo:* Esta prueba permite determinar la estabilidad de la indicación del instrumento cuando es sometido a una carga constante por un determinado tiempo.

Tabla 4. Máximos Errores para Masas Según su Clase ( $\pm\Delta m$  en mg)

Nominal value*	Class E <sub>1</sub>	Class E <sub>2</sub>	Class F <sub>1</sub>	Class F <sub>2</sub>	Class M <sub>1</sub>	Class M <sub>1,2</sub>	Class M <sub>2</sub>	Class M <sub>2,3</sub>	Class M <sub>3</sub>
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5.0	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2.5	8.0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1.0	3.0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0.5	1.6	5.0	16	50		160		500
500 g	0.25	0.8	2.5	8.0	25		80		250
200 g	0.10	0.3	1.0	3.0	10		30		100
100 g	0.05	0.16	0.5	1.6	5.0		16		50
50 g	0.03	0.10	0.3	1.0	3.0		10		30
20 g	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5		8.0		25
10 g	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0		6.0		20
5 g	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6		5.0		16
2 g	0.012	0.04	0.12	0.4	1.2		4.0		12
1 g	0.010	0.03	0.10	0.3	1.0		3.0		10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8		2.5		
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6		2.0		
100 mg	0.005	0.016	0.05	0.16	0.5		1.6		
50 mg	0.004	0.012	0.04	0.12	0.4				
20 mg	0.003	0.010	0.03	0.10	0.3				
10 mg	0.003	0.008	0.025	0.08	0.25				
5 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
2 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
1 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				

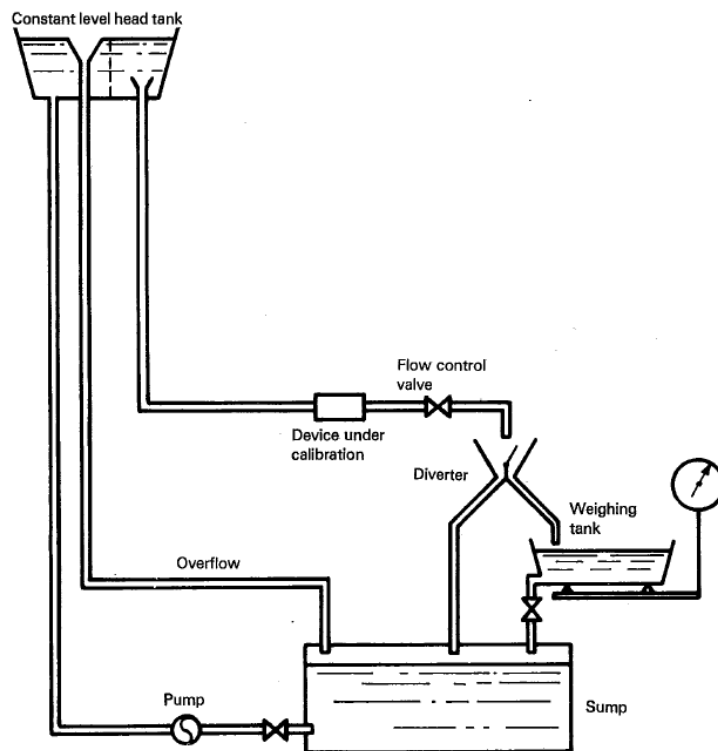
Fuente: OIML R111-1

## 2. MEDICIÓN DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO

### 2.1 PRINCIPIO

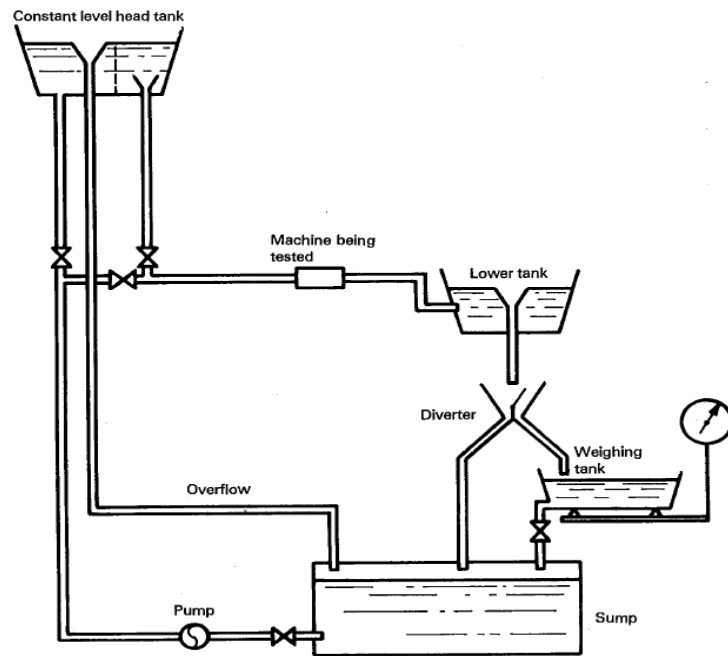
El principio de la medición de flujo por el método gravimétrico, se basa en la determinación de la masa neta del líquido colectada en un intervalo de tiempo determinado, deducida de la diferencia entre el peso del tanque de colección antes y después de la prueba. Las figuras 13, 14 y 15 muestran algunas instalaciones típicas de estos sistemas.

Figura 13. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado por un tanque de nivel constante.



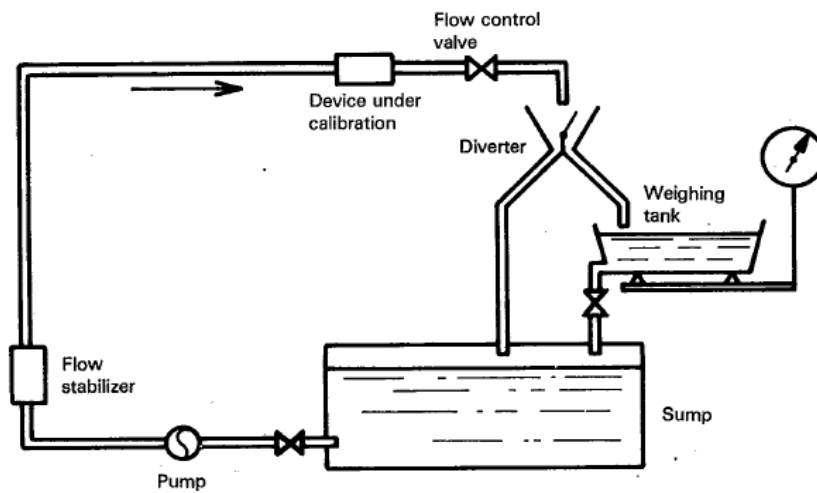
Fuente: ISO 4185

Figura 14. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado por don tanques de nivel constante.



Fuente: ISO 4185

Figura 15. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico alimentado directamente de bombas.



Fuente: ISO 4185

## 2.2 REQUISITOS

El método gravimétrico brinda una alta precisión en la medición del caudal si se tienen en cuenta los siguientes requisitos:

- ✚ No existen fugas en el circuito
- ✚ No exista acumulación de líquido en el circuito por contracción o expansión térmica
- ✚ Efectuar la corrección correspondiente por la influencia del peso aparente.
- ✚ Los mecanismos de pesaje, cronometro y métodos de arranque y parada satisfagan la precisión necesaria.
- ✚ El tiempo para que el diverter realice la conmutación sea pequeño con respecto al tiempo de llenado.
- ✚ El cronometro es iniciado y detenido cuando el diverter pasa por la línea central del chorro.

## 2.3 COMPONENTES PRINCIPALES

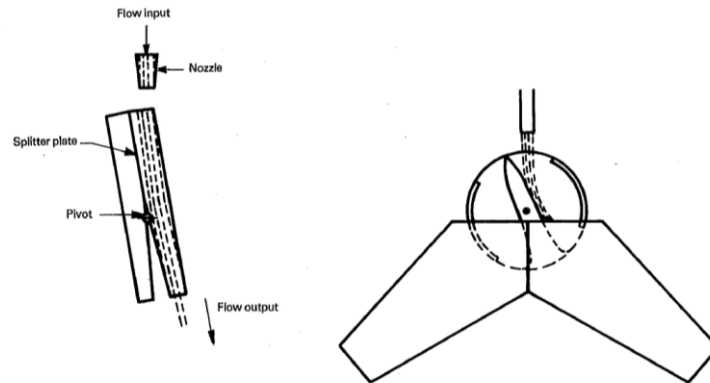
### 2.3.1 Dispositivo desviador de flujo: DIVERTER

Es un mecanismo móvil usado para direccionar alternativamente el flujo a lo largo de un curso normal en by-pass hacia un tanque aforado o de pesaje.

El movimiento del diverter deberá ser lo suficientemente rápido, con el fin de reducir la posibilidad de generar un error excesivo durante la medición del tiempo de llenado. Este movimiento del diverter puede ser generado por varios mecanismos eléctricos o mecánicos, como por ejemplo un actuador eléctrico o neumático.

El efecto del error producido por el diverter, especialmente en los bancos de calibración de alta precisión, es una parte crítica en la medición final de la incertidumbre; por lo tanto es necesario un adecuado y cuidadoso diseño.

Figura 16. Ejemplos de diverter.



Fuente: ISO 4185

Se debe tener cuidado con el diseño de las partes mecánicas del diverter, para que durante su operación, no se presenten fugas o salpicaduras de líquido de un canal al otro o fuera del mismo. Además a altos caudales se pueden presentar esfuerzos excesivos que se deben considerar tanto en la resistencia del diseño y de los materiales y el torque necesario para realizar su conmutación.

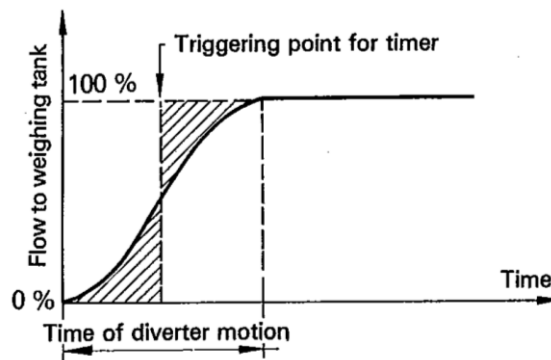
Para realizar la desviación de flujo, es igualmente válido la utilización de válvulas de tres vías o un arreglo de válvulas automáticas, las cuales exhiban tiempos de conmutación rápidos. El empleo de estos elementos afecta el proceso de calibración, aumentando la incertidumbre asociada a la medición.

### 2.3.2 Sistema de medición del tiempo

El tiempo de descarga dentro del tanque de pesaje es normalmente medido con un contador electrónico, con un preciso sistema de referencia, por ejemplo un cristal de cuarzo. El error provocado por esta fuente puede ser despreciable si la resolución del contador es suficientemente alta.

La activación y parada del cronometro debe ser accionada por el movimiento del diverter, generalmente es aceptado que el punto de activación corresponda a la posición media del diverter en el chorro de fluido; generando un error que es insignificante siempre y cuando, el tiempo que demora el diverter en atravesar el chorro sea despreciable en comparación con el periodo de desviación al tanque.

Figura 17. Regla operación del diverter.



Fuente: ISO 4185

### 2.3.3 Tanque de pesaje

El tanque dentro del cual el flujo se descarga durante cada etapa de medición, deberá tener la suficiente capacidad con el fin de que el error por cronometraje sea despreciable. Según norma el tiempo de llenado para los altos caudales será un mínimo de 30 segundos.

El tanque debe estar perfectamente libre de fugas y/o derrame de líquido. Se le puede acondicionar de baffles internos para reducir las oscilaciones del líquido y mejorar su rigidez.

El drenaje del tanque debe ser lo suficientemente alto para vaciar el tanque rápidamente y el intervalo entre pruebas sea corto. El drenaje se puede hacer de diferentes maneras: válvula de bloqueo en la base, un sifón con buen sello o una bomba sumergible

En todos los casos es necesario revisar cuidadosamente que no exista conexión de tuberías o cables eléctricos que transmitan esfuerzos entre el tanque de pesaje y las partes fijas de la instalación, que afecten la medida del instrumento de pesaje.

#### **2.3.4 Sistema de pesaje**

El sistema de pesaje puede ser mecánico o por celdas de carga, que proporcione los requisitos necesarios de sensibilidad, exactitud y confiabilidad.

Luego de su instalación, el sistema de pesaje debe ser calibrado en todo el intervalo, empleando pesas patrón y siguiendo las recomendaciones de la OIML.

#### **2.3.5 Línea de Calibración.**

Aunque los medidores bajo prueba sean o no afectados por las condiciones del flujo dependiendo de su principio de operación, es necesario en el proceso de calibración garantizar un flujo libre de remolinos, recirculación, pulsaciones y distorsiones del perfil, con el fin de disminuir las posibles fuentes de error en la medición realizada por los medidores bajo prueba y de generar unas condiciones de operación estables. Un flujo totalmente desarrollado es conseguido adicionando tubería recta aguas arriba y aguas abajo del medidor y un rectificador y/o acondicionador de flujo.

## 2.4 CÁLCULOS

Con el método gravimétrico, se realiza la calibración de medidores de flujo de líquidos tanto en masa como en volumen, esta última incluye la medición de la densidad del fluido de calibración, lo que permite obtener los diferentes mensurados relacionados en la Tabla 5, donde se da la respectiva expresión matemática para realizar el cálculo de cada uno de ellos.

Tabla 5. Mensurados - Método Gravimétrico

MENSURANDO	ECUACIÓN
Masa Totalizada	$m_{TOTAL} = m_{REF} = \int_0^{T_{MED}} m \cdot dt = q_m \cdot T_{MED}$
Flujo Másico (Promedio)	$q_m = m = \frac{m_{REF}}{T_{MED}}$
Volumen Totalizado	$V_{TOTAL} = \frac{m_{REF}}{\rho_{AGUA}} = \int_0^{T_{MED}} V \cdot dt = q_v \cdot T_{MED}$
Flujo Volumétrico (Promedio)	$q_v = V = \frac{m_{REF}}{\rho_{AGUA} \cdot T_{MED}}$

Fuente: El Autor

Donde:

$m_{REF}$  = Masa de referencia recolectada y pesada en la balanza [kg]

$T_{MED}$  = Tiempo de medición (periodo que duró la recolección de agua) [s]

$\rho_{AGUA}$  = Densidad del agua [Kg/m<sup>3</sup>]

## 2.5 INSTALACIONES PARA CALIBRACIÓN EXISTENTES

En la calibración de medidores de fluidos líquidos, dentro del ámbito de aplicación de los principios de medición posibles, las instalaciones de referencia basadas en

el método gravimétrico han demostrado que proporcionan los mejores niveles de exactitud en la calibración de medidores.

Los principales Laboratorios de Metrología y los fabricantes más reconocidos a nivel mundial, han desarrollado facilidades de calibración de medidores de líquidos empleando el método gravimétrico estático, la Tabla 6 presenta un resumen de los diferentes métodos utilizados en diferentes laboratorios y la incertidumbre típica obtenida para cada uno de ellos (se incluyen algunos países Latinoamericanos con el objeto de comparar las incertidumbres reportadas). Se puede apreciar que el método gravimétrico es ampliamente utilizado y representa el método con menor incertidumbre, en comparación con el método volumétrico.

Tabla 6. Sistemas de calibración de medidores de líquidos a nivel internacional.

País	Laboratorio	Alcance	Incertidumbre	Método de calibración	Referencia
Alemania	PTB	35 - 35000 L/min	0,02 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
U.K.	NEL	0 - 720 L/min	0,03 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
Holanda	NMi-VSL	30 - 6670 L/min	0,02 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
México	CENAM	300 - 12000 L/min	0,038 % k=2	Gravimétrico Dinámico	Sistema de pesaje
		300 - 12000 Kg/min	0,024 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
U.S.A.	NIST	40 - 1600 L/min	0,033 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
Argentina	INTI	200 - 7000 Kg/min	0,045 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
		230 - 4500 Kg/min	0,07 % k=2	Comparación Directa	Master Meter
Chile	Calibraciones Industriales S.A.	5 - 200 L/min	0,10 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
		10 - 5250 L/min	0,25 % k=2	Volumétrico	Patrón Volumétrico
Cuba	INIMET	50 - 2500 L/min	0,15 % k=2	Volumétrico	Patrón volumétrico
		60 - 1300 L/min	0,20 % k=2	Comparación Directa	Master Meter
Perú	INDECOPI	100 - 2000 L/min	0,20 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
		7,5 - 2000 L/min	0,50 % k=2	Volumétrico	Patrón volumétrico
U.S.A.	Micromotion	0,01 - 27000 Kg/min	0,03 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje
Alemania	Endress & Hauser	72 - 432000 Kg/min	0,015 % k=2	Gravimétrico Estático	Sistema de pesaje

\* Datos obtenidos de los sitios web de cada laboratorio.

Fuente: El Autor.

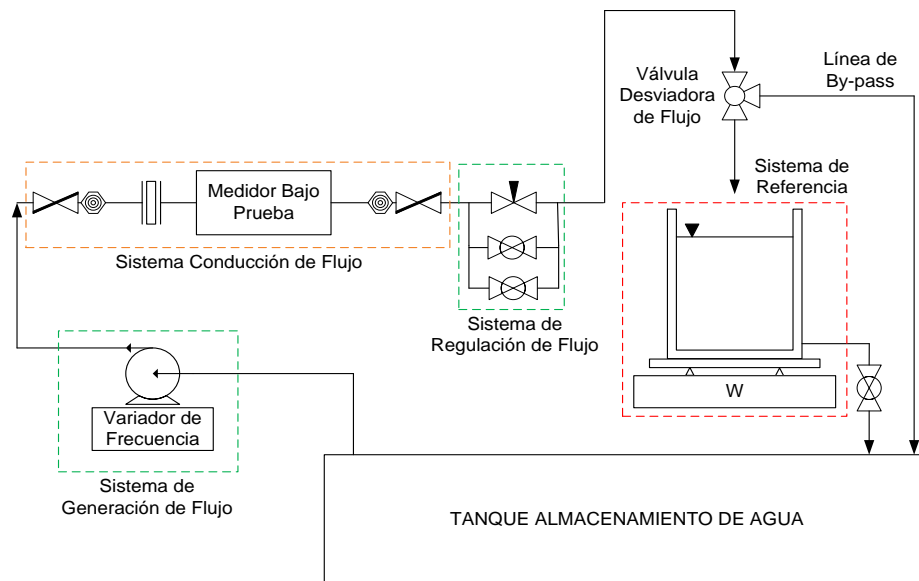
Basados en lo anterior, la estrategia a desarrollar en la corporación CDT de GAS, consiste en la implementación de este método de calibración, de manera que se brinde la mejor cadena de trazabilidad y la mínima incertidumbre posible.

La estrategia de aseguramiento de medidores de líquidos será desarrollada a partir del método gravimétrico, el cual permitirá realizar la calibración de medidores máscos en un alcance de 1 L/min a 1400 L/min y con mejor capacidad de medición en masa menor a 0,1%.

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN

En términos de diseño conceptual, la infraestructura de calibración puede ser representada como un circuito hidráulico, en el que el fluido de calibración es impulsado por un sistema de bombeo, que junto con el variador de frecuencia y el sistema de regulación, permiten graduar el caudal de flujo másico que circula por el sistema de conducción (*Figura 19*). El líquido bombeado circula por las tuberías de medición, pasando por el medidor bajo prueba hasta el sistema de pesaje de referencia.

Figura 18. Diagrama Componentes Principales del Sistema de Calibración



Fuente: El Autor

Para garantizar las condiciones de estabilidad de caudal másico, temperatura y presión que se deben lograr antes de iniciar la calibración, el líquido en primera instancia circula por la línea de bypass. Una vez se logra el nivel de estabilidad requerido, la válvula desviadora de flujo conmuta el fluido hacia el sistema de referencia, en ese momento se inicia el registro de masa en el medidor y se inicia

el conteo de tiempo. Una vez se almacena la masa de agua preestablecida, la válvula desviadora de flujo conmuta nuevamente dirigiendo el fluido por la línea de bypass, simultáneamente se detiene el registro de masa en el medidor y la lectura del tiempo.

En esta etapa, Se requiere de un intervalo de tiempo para que la masa de agua que se encuentra en el tanque de pesaje alcance una condición de equilibrio. Una vez lograda esta condición, se cuantifica la masa de agua recolectada, y el flujo másico promedio se determina como la razón o relación de la masa de agua recolectada al tiempo que duró la recolección, de acuerdo con la ecuación de flujo másico presentada en la Tabla 5.

### **3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CALIBRACION**

El sistema de calibración diseñado esta integrado por los siguientes componentes fundamentales:

#### Sistema de conducción de flujo

- 4 juegos de tuberías de medición que permiten acoplar a la facilidad medidores de 1/2", 1", 2" y 3".
- Tres acondicionadores de Flujo instalados aguas arriba del medidor, uno para cada juego de tubería de medición.
- Válvulas manuales y automáticas para el direccionamiento del flujo de líquido a través del Sistema. Adicionalmente dos válvulas de purga de aire.

#### Sistema de Referencia

- Tres Balanzas con capacidades máximas de 60, 150 y 1500 Kg
- Tres tanques de recolección de agua con capacidades de 70, 180 y 1600 Litros.

#### ✚ Sistema de Generación de Flujo y Regulación

- Un tanque de almacenamiento de agua con capacidad de 2200 Litros.
- Válvulas de regulación de flujo de aguja de 1" y de globo de 2" y 3"
- Dos Bombas centrifugas de 6,6 Hp ( $Q_{max} = 1040 \frac{L}{min}$ ,  $H_{max} = 34 \text{ mca}$ ) y de 20 Hp ( $Q_{max} = 1495 \frac{L}{min}$ ,  $H_{max} = 57 \text{ [mca]}$ ). para generación de flujo
- Dos Variadores de frecuencia para controlar la velocidad de rotación de las Bombas.

#### ✚ Instrumentación, Sistema de Adquisición de Datos y Control

- Instrumentos de medición como sensores de temperatura, transductores de presión y medidores de humedad.
- Un sistema de adquisición de datos que registra los valores de todos los instrumentos utilizados durante la calibración. Los datos provienen de los sensores de presión y temperatura, del medidor bajo prueba y de las balanzas.
- Un sistema OPTO 22 para realizar el control de las válvulas automáticas, las bombas y los variadores de velocidad y seleccionar los sensores para la realimentación del sistema, controlado desde un PC dedicado.

#### ✚ Estructuras y Soportes

- Estructuras principales de soporte y soportes auxiliares para tuberías y subsistemas.

Como herramienta CAD para el dibujo de los elementos y la distribución del banco mismo, se utilizó el software SolidWorks 2012, de Dassault Systemes.

A continuación se describe en detalle los parámetros de diseño de cada uno de los componentes anteriormente mencionados.

## 3.2 SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE FLUJO

### 3.2.1 Tuberías de medición

Las tuberías de medición corresponden a los tramos rectos que se instalan aguas arriba y aguas abajo del medidor a calibrar, con el objetivo de acoplarlo al sistema de calibración y de generar las condiciones óptimas de flujo. Su diseño contemplo condiciones que garanticen el desarrollo del perfil de velocidad, libre de pulsaciones y swirl durante el tiempo de calibración.

Aunque los medidores másicos tipo coriolis no se ven afectados por las condiciones de flujo a la entrada como el swirl, las asimetrías en el perfil o los incrementos en la turbulencia<sup>14</sup>, y por esto no requieren de condiciones especiales de instalación en lo referente a la longitudes de tubería; en pruebas de laboratorio y en especial cuando se trata de un proceso de calibración es mejor asegurar las mejores condiciones de instalación posibles, por ello, el diseño de las tuberías de medición contemplo las recomendaciones de instalación presentadas en el API y por algunos de los fabricantes para los diferentes tipos de medidores de líquidos, las cuales en resumen deben ser de al menos diez diámetros (10D) de tubería recta aguas arriba y 5 diámetros (5D) de tubería recta aguas abajo en el mismo diámetro del medidor.

Tabla 7. Longitudes Mínimas de Tubería de Medición

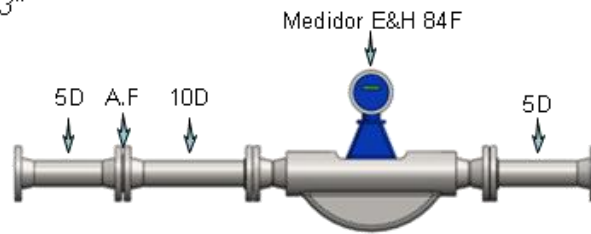
DIAMETRO DEL MEDIDOR [in]	LONGITUD MINIMA [in]	
	AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO
1/2	5	2,5
1	10	5
2	20	10
3	30	15

Fuente: El Autor.

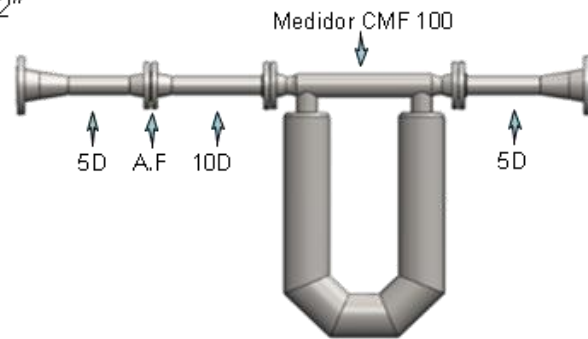
<sup>14</sup> R. Cheesewright, C. Clark, D. Bisset. The Identification of external factors which influence the calibration of coriolis mass flow meters. Flow Measurement and Instrumentation 11 (2000), 1-10.

Figura 19. Diseño de las Tuberías de Medición – CAD

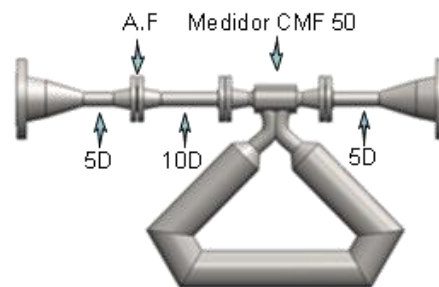
*Tubería de Medición de 3"*



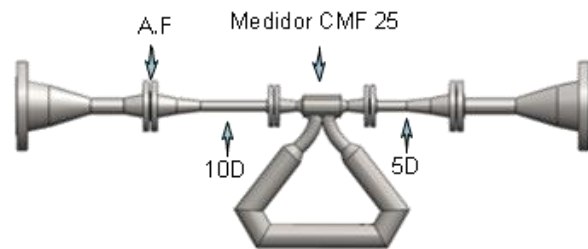
*Tubería de Medición de 2"*



*Tubería de Medición de 1"*



*Tubería de Medición de 1/2"*



Fuente: El Autor.

Las tuberías de medición se fabricarán en tubería Schedule 40 de acero inoxidable 304 sin costura, con el fin de tener una rugosidad que permita la formación del perfil de flujo y además brindar la ventaja de no presentar reducción por oxidación en su diámetro interno con el paso del tiempo.

Los tramos de tuberías aguas arriba y abajo del medidor, tendrán un extremo roscado, para brindar la flexibilidad de montaje a medidores con conexiones bridadas en diferente ANSI o conexión con unión universal roscada. Los demás tramos de tubería se unen por medio de bridas WN ANSI 150 y la soldadura debe ser pulida en su interior.

### **3.2.2 Acondicionadores de flujo**

Al mismo tiempo de considerar los tramos de tuberías aguas arriba y abajo del medidor, se diseñaron acondicionadores de flujo con la finalidad de garantizar un adecuado perfil de flujo que genere buen nivel de repetibilidad y reproducibilidad en los resultados de calibración.

El acondicionador de flujo (A.F) diseñado es de tipo placa perforada (TIPO B: Zanker, Spearman, NOVA, Mitsubishi), los cuales remueven eficientemente el fenómeno del swirl y ayudan a mejorar las asimetrías en el perfil; además presentan facilidades de mantenimiento y bajo costo de fabricación<sup>15</sup>. Se selecciono el tipo NOVA y las dimensiones se determinaron basadas en la norma ISO 5167-1 Anexo C<sup>16</sup>.

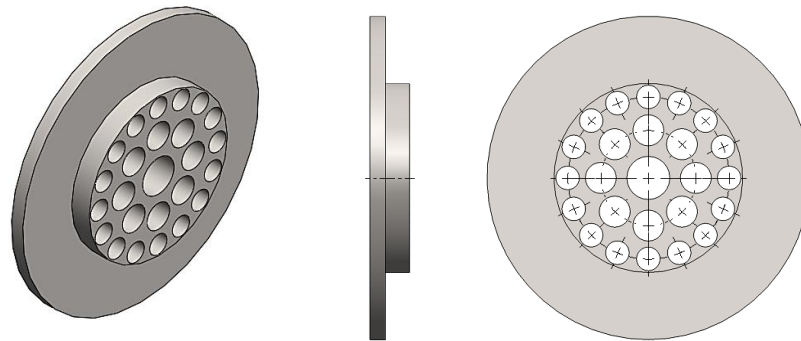
---

<sup>15</sup> Andrea Frattolillo, Nicola Massarotti. Flow Conditioners Efficiency a comparison based on numerical approach. Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002) 1-11.

<sup>16</sup> International Standard ISO 5167-1 "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – General principles and requirements". Geneva: ISO, 2003. 37 p.

Estas placas serán ubicadas entre bridas, con una distancia de 5 diámetros de tubería recta aguas arriba y una distancia de 10 diámetros de tubería recta aguas abajo, los cuales corresponden a los 10 diámetros aguas arriba del medidor a calibrar (*Figura 20*). Para cada juego de tubería de medición (1", 2" y 3") se diseñó una placa con autocentrante entre pernos para dar facilidad a su instalación (*Figura 21*). El material de fabricación es acero inoxidable 304.

Figura 20. Diseño del acondicionador de flujo - CAD



Fuente:El Autor.

### 3.2.3 Válvulas desviadoras de flujo

Basado en la estrategia de fortalecimiento de la corporación CDT de GAS para mejorar sus capacidades de medición en la rama de los fluidos líquidos, se diseñó inicialmente para el banco de calibración un arreglo de válvulas como dispositivo desviador de flujo. El diseño detallado del diverter es contemplado en una etapa posterior al desarrollo de este proyecto, y una buena construcción de este elemento requiere un soporte presupuestal mas elevado.

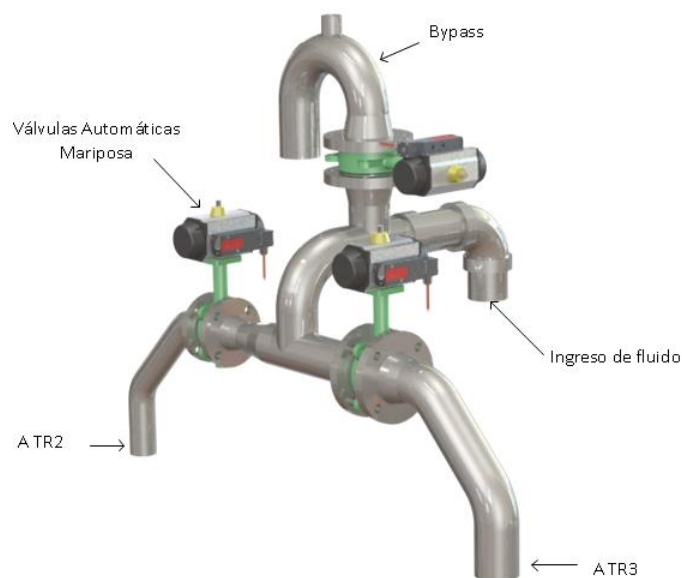
El sistema de válvulas desviadores de flujo tienen la función principal de mantener un flujo de bypass sobre el medidor, mientras se establece el punto de calibración, se regula el caudal y se estabiliza el flujo, para seguidamente, cuando el proceso

de calibración se desee iniciar, se desvíe el flujo hacia el tanque de recolección en el sistema de pesaje durante el tiempo de la prueba establecido.

Como el banco posee 3 balanzas en su sistema de referencia, cada una con sus tanques de recolección, se realizaron dos diseños; el primero (SVD-1) (*Figura 22*) contempla el direccionamiento de flujo para las balanzas de 150 Kg y la de 1500 Kg y otro diseño (SVD-2) (*Figura 23*) contempla la balanza de 60 Kg. El material de fabricación es acero inoxidable 304.

Las líneas de bypass en los sistemas de válvulas desviadoras se diseñaron con un nivel mas elevado que el nivel de entrega del fluido al tanque de recolección y con forma de un codo de 180°, con el fin de que se garantice el llenado completo de los tramos de tubería antes de la válvula que bloquea la entrega del agua y para que en el instante de accionar dicha válvula, inmediatamente se genere el flujo hacia el sistema de pesaje.

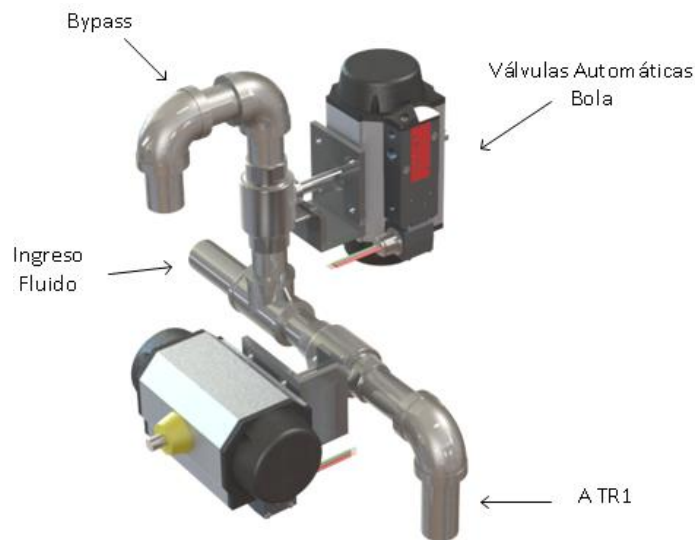
Figura 21. Sistema de Válvulas Desviadoras SVD-1 - CAD



Fuente: El Autor.

Como el proceso de calibración se inicia de manera instantánea con la toma de la señal de pulsos emitida por el medidor másico tipo coriolis, la conmutación de las válvulas debe producirse en este mismo instante para dar paso de agua al sistema de pesaje. Por tal razón las válvulas para este sistema se seleccionaron automáticas y con un tiempo de respuesta rápido en su accionamiento.

Figura 22. Sistema de Válvulas Desviadoras SVD-2 - CAD




Fuente: El Autor.

Las válvulas automáticas se seleccionaron de tipo mariposa las cuales presentan poca caída de presión, y que al momento de accionarlas, inmediatamente permita el paso del fluido y no se presente un bloqueo en el flujo por el medidor y una posible sobrepresión en los intermedios y altos caudales, como podría ocurrir si se emplearan válvulas tipo bola. Las válvulas tipo mariposa, comercialmente son fabricadas en tamaños desde 2" en adelante, por lo que para el SVD-2 con tubería de diámetro 1", se emplearon válvulas tipo bola, aunque es una línea para bajos caudales y en este caso no genera ningún inconveniente.

Las válvulas seleccionadas tanto de mariposa como de bola son de marca CRANE, con actuadores neumáticos CRANE AIR con sus respectivas válvulas solenoide para realizar la conmutación eléctricamente por medio del sistema de control.

Tabla 8. Características Técnicas Válvulas Mariposa Automáticas.

VALVULA DE MARIPOSA AUTOMATICA	
<b>MARCA</b>	CRANE
<b>MODELO</b>	Center Line Series 200
<b>CUERPO</b>	Epoxi Coated DI ASTM A536 - Tipo: Wafer
<b>DISCO</b>	316 SS
<b>EJE</b>	316 SS
<b>ASIENTO</b>	EPDM
<b>BUSHING</b>	PTFE
<b>ACTUADOR</b>	CRANEAIR Doble efecto: CA03DA-23
<b>VÁLVULA SOLENOIDE</b>	ASCO WT8551A001MSAC120 --- 5/2



Fuente: El Autor

Tabla 9. Características Técnicas Válvulas Bola Automáticas.

VALVULA DE BOLA AUTOMATICA 1"	
<b>Marca</b>	CRANE
<b>Modelo</b>	Ball Valves - 9431
<b>Cuerpo</b>	Roscado SS
<b>Actuador</b>	CRANEAIR Doble efecto: CA02DA-23
<b>Válvula Solenoide</b>	ASCO WT8551A001MSAC120 --- 5/2

Fuente: El Autor

### 3.2.4 Juntas Flexibles

Como los medidores máscicos tipo coriolis operan por medio de tubos vibrantes, estos pueden presentar errores en su medición cuando son instalados en

ambientes donde la tubería u otro equipo cercano generan o transmiten vibraciones cercanas a la frecuencia de su funcionamiento<sup>17</sup>. Para evitar lo anterior se recomienda aislar el sensor y para ello se considero en el diseño el uso de juntas de expansión en caucho ubicadas en los extremos del medidor, antes y después de las tuberías de medición.

Las juntas de expansión en caucho son de marca Dinatecnica y se seleccionó la referencia JEBX 150 con bridas giratorias, para que además de su función de reducir las vibraciones, permitan desalineación en las bridas, producto del montaje del medidor con conexiones roscadas.

Figura 23. Junta de Expansión en Caucho



Fuente: <http://www.dinatecnica.com.ar>

### **3.2.5 Tuberías de Instrumentación y de Conexión.**

Además de las tuberías de medición, se diseñaron 2 tramos de tubería para instalar la instrumentación secundaria (sensores de temperatura y presión). Cada uno de los tramos se ubica aguas arriba y aguas debajo de las tuberías de medición (*Figura 26*), con el fin de determinar las condiciones de operación del mismo.

Basados en la selección de los instrumentos (Capítulo 3 – sección 3.6), se determinaron conexiones de  $\frac{3}{4}$ " para los termopozos y de  $\frac{1}{4}$ " para los

---

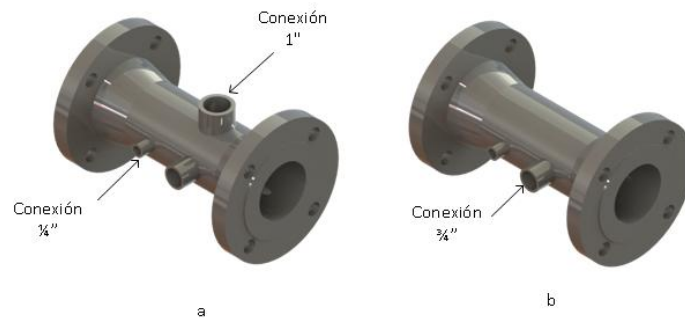
<sup>17</sup> Micro Motion Inc. "Proving Coriolis Flow meters". Washington, D.C.: 1998, p 218-220.

instrumentos de presión. Los tramos son fabricados en tubería de 3" Sch 40 en acero inoxidable 304 y con bridas #150 WN para su unión al sistema. (Figura 25).

Además en el tramo ubicado aguas arriba del medidor se dispuso una conexión de 1" para la ubicación de una válvula ventosa, con el fin de extraer el aire de la tubería en el proceso de llenado y de admitir aire en condiciones de vacío.

Las conexiones entre los distintos sistemas se realizara empleando manguera plástica transparente de 3" de diámetro que soporte la presión que se genera en la operación del banco de calibración, ( $P_{m\acute{a}x} = 80 \text{ psi}$ ), esto con el fin de poder observar si toda la tubería se encuentra totalmente llena a lo largo de sistema y no se presentan succiones de aire que puedan alterar el resultado de calibración.

Figura 24. Tramos de Instrumentación – a. Aguas Arriba – b. Aguas Abajo



Fuente: El Autor

Figura 25. Línea de Calibración de 3"



Fuente: El Autor.

### 3.3 SISTEMA DE REFERENCIA

El sistema de referencia está constituido por Tres (3) balanzas de precisión y tres (3) tanques de recolección de agua. A continuación se describe en detalle cada uno de estos elementos.

#### 3.3.1 Tanques de pesaje

Los tanques de pesaje son los encargados de almacenar el agua durante el periodo de calibración. Se diseñaron acorde a los alcances de medición de las balanzas de referencia y del tiempo de recolección. Se diseñaron tres (3) tanques con las características presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Características de los Tanques de Recolección de Agua

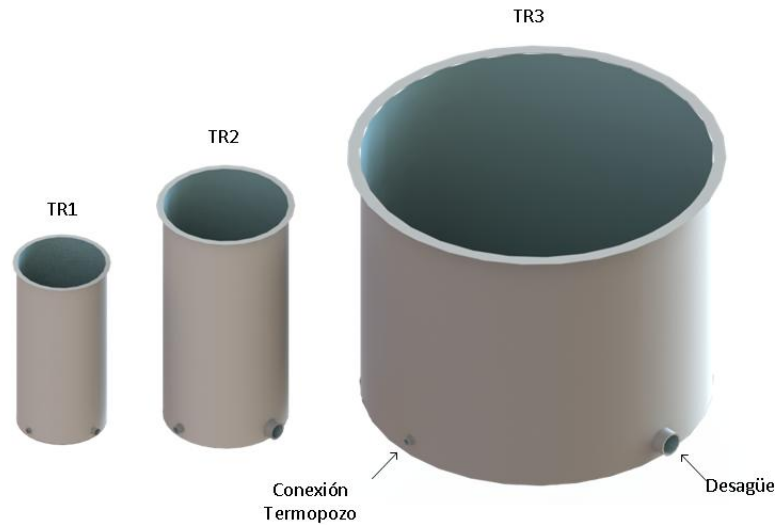
DENOMINACIÓN	TR 1	TR 2	TR 3
Dimensiones (diámetro x altura) [m]	0,36 x 0,7	0,5 x 1	1,4 x 1,1
Diámetro desagüe	1"	2"	3"
Capacidad [L]	70	180	1600
Flujo nominal [kg/min]	1 a 45	45 a 135	135 a 1400

Fuente. El Autor.

Un aspecto relevante está relacionado con el material de fabricación del tanque, su diseño consideró fibra de vidrio, un material resistente, económico y liviano; esta última característica la más importante, por que no ocasiona una reducción considerable en el alcance de las balanzas.

Ademas de la conexión para el desagüe de los tanques, se considero en el diseño la disposicion de conexiones de  $\frac{3}{4}$ " para la ubicación de termoposos, con el fin de sensar la temperatura del fluido de calibracion en dichos recipientes.

Figura 26. Tanques de Recolección de Agua - CAD



Fuente: El Autor.

### 3.3.2 Balanzas

En la calibración por el método Gravimétrico, el sistema estático de pesaje actúa como patrón de referencia y brinda la cadena de trazabilidad, es por ello que la selección de las balanzas es de gran importancia, además que la resolución de estos instrumentos juega un papel importante como contribución en la estimación de incertidumbre y al desempeño del banco. (Anexo 1).

Considerando lo anterior, se diseñó un sistema de pesaje constituido por tres balanzas, cada una de ellas con su respectivo indicador.

Tabla 11. Características de Sistema de Referencia

DENOMINACIÓN	BLZ1	BLZ2	BLZ3
Capacidad máxima [kg]	60	150	1500
Resolución [kg]	0,001	0,001	0,01/0,02/0,05
Clase	II	II	III
Flujo nominal [kg/min]	1 a 45	45 a 135	135 a 1400

Fuente: El Autor.

De las tres balanzas presentadas, la *BLZ1* y la *BLZ2* ya habían sido adquiridas con anterioridad por la Corporación CDT de GAS en proyectos anteriores, razón por la cual esta etapa de diseño consistió en la selección de la *BLZ3*, compuesta por una plataforma de pesaje y un indicador, que satisfaga el alcance requerido de 1500 [Kg] con buenas características de medición, y que permita mantener un nivel bajo de incertidumbre asociada a su medición.

Se preseleccionaron las balanzas presentadas en la siguiente tabla.

Tabla 12. Preselección Balanzas 1500 Kg

Fabricante	Mettler Toledo	Sartorius	Mettler Toledo
<b>Modelo</b>	KES 1500	4-1500RR	XP 2003 KL
<b>Capacidad[Kg]</b>	300/600/1500	1500	2500
<b>Resolución d [g]</b>	10/20/50	50	1
<b>Intervalo de Verificación e [g]</b>	100/200/500	500	10
<b>Clase</b>	III	III	II
<b>Dimensiones [mm]</b>	1500 x 1500	1500 x 1500	1500 x1250
<b>Indicador</b>	ICS429	CAW2P	IDN690
<b>Comunicación</b>	RS232	RS232	RS232
<b>Precio</b>	\$26'997.376	\$20'083.312	\$175'000.000

Fuente: El Autor.

Considerando el aspecto de la resolución del sistema de pesaje, entre los otros 3 equipos, se seleccionó la balanza de Mettler Toledo clase III (MEDIA), que ofrece resoluciones diferentes de 10 g, 20 g y 50 g en cada intervalo de medición de 300 kg, 600 kg y 1500 kg respectivamente, en comparación con la balanza Sartorius, la cual ofrece una resolución de 50 g en todo el rango de medición. Además se

encuentra dentro de los límites presupuestales destinados a la adquisición de este equipo.

La balanza seleccionada en su desempeño metrológico, se considera como 3 balanzas por separado, correspondientes a cada uno de sus intervalos, lo que da buena flexibilidad al sistema de pesaje del banco de calibración. De igual forma en su proceso de calibración y aseguramiento metrológico, se tiene un mejor control para la balanza KES 1500 de Mettler Toledo, pues los errores máximos permitidos para cada uno de sus intervalos, son menores comparados con la balanza Sartorius; esto se aprecia en la siguiente tabla basada en la Tabla 3.

Tabla 13. Rangos de operación y Errores máximos permitidos

<b>Mettler Toledo - KES 1500</b>	
<b>Rango de Operación [Kg]</b>	<b>Error Máximo Permitido [Kg]</b>
0 – 50	± 0,1
50 – 200	± 0,2
200 - 300	± 0,3
300 – 400	± 0,4
400 – 600	± 0,6
600 - 1000	± 1,0
1000 – 1500	± 1,5

<b>Sartorius - 4-1500 RR</b>	
<b>Rango de Operación [Kg]</b>	<b>Error Máximo Permitido [Kg]</b>
0 – 250	± 0,5
250 – 1000	± 1,0
1000 - 1500	± 1,5

Fuente: El Autor.

Para el óptimo desempeño como patrón de referencia, la calibración de este instrumento debe ser la mejor posible; por tal razón la adquisición de este equipo se debe realizar con un servicio de calibración acreditado que garantice la trazabilidad en esta magnitud a los patrones nacionales.

Analizando los diferentes laboratorios acreditados ante la ONAC<sup>18</sup> en masas y balanzas a nivel nacional, y su capacidad de medición y calibración (CMC), se determinó que la incertidumbre de calibración esperada para este tipo de balanzas es aproximada a:


$$U_{kg} = 0,058 + 0,00002391 \cdot m \text{ Kg} \quad \text{Ecuación 14}$$

<sup>18</sup> Organismo Nacional de Acreditación de Colombia

Esta incertidumbre depende de la masa que se esté midiendo; y para el caso en específico del banco de calibración, la balanza BLZ3 opera desde 135 Kg, con esta masa se obtiene una incertidumbre porcentual de 0,045%, lo que asegura que este equipo proporcionara menor incertidumbre de la esperada en el proceso de calibración del banco y sirve como patrón de referencia.


Las características más detalladas de la *BLZ3* y su terminal seleccionados se presentan a continuación.

Tabla 14. Características de las Balanzas BLZ3

<b>MODELO</b>	KES1500	
<b>CAPACIDAD MAXIMA</b>	300 kg/ 600 kg/ 1500 kg	
<b>PRECISIÓN</b>	10 g / 20 g/ 50 g	
<b>ESCALA INDICACIÓN VERIFICADA</b>	100 g/ 200 g/ 500 g	
<b>TAMAÑO</b>	1500 X 1500 [mm]	
<b>GRADO DE PROTECCIÓN</b>	IP66/67	
<b>APROBACIÓN DE RIESGOS</b>	3GD	
<b>ALTURA</b>	197-222 [mm]	
<b>MATERIAL PLATAFORMA</b>	Acero Inoxidable	

Fuente: El Autor.

Tabla 15. Características del terminal de pesaje

<b>MODELO</b>	ICS429	
<b>PANTALLA</b>	LCD	
<b>INTERFASES</b>	RS232(Estándar); Ethernet	
<b>GRADO DE PROTECCIÓN</b>	IP66, IP68, IP69k	
<b>FRECUENCIA A/D (INT./EXT.)</b>	0,264 $\mu$ V/e	
<b>RESOLUCIÓN</b>	300,000 d	
<b>PRECISIÓN DE LA INDICACIÓN</b>	1X3,000e OIML	
<b>TRATAMIENTO DE SEÑALES</b>	2-3 mV/V	
<b>DIMENSIONES</b>	232X132X115 [mm]	
<b>ALIMENTACIÓN</b>	CA Directa	

Fuente: El Autor.

### 3.4 SISTEMA DE GENERACIÓN Y REGULACIÓN DE FLUJO

Este sistema esta compuesto por el tanque de almacenamiento del fluido de calibración, el sistema de regulación del flujo y el sistema de bombeo. A continuación se detallan cada uno de ellos.

#### 3.4.1 Tanque de almacenamiento de agua

Su función principal es la de mantener una disponibilidad constante del fluido de calibración durante el desarrollo de las pruebas. El tanque de almacenamiento de agua tiene una capacidad de 2200 L, fue diseñado en forma rectangular con las dimensiones mostradas en la tabla 16, con esta geometría se logra que el cambio de nivel del agua durante una calibración sea gradual y no genere picos de carga en la cabeza estática de la bomba, manteniendo la estabilidad del flujo, además de que el NPSH disponible no se afectara de manera considerable y así asegurar el buen funcionamiento del sistema de bombeo. También permitir buena área superficial para garantizar estabilidad térmica del agua.

Tabla 16. Características geométricas del tanque de almacenamiento de agua.

<b>PROFUNDIDAD</b>	0,6 [m]
<b>LARGO</b>	4,1 [m]
<b>ANCHO</b>	1,1 [m]

Fuente: El Autor.

La estimación de la capacidad volumétrica del tanque de almacenamiento fue realizada teniendo en cuenta que a máximo caudal de operación, se desplazan 1400 litros hacia el tanque de pesaje, por lo tanto debe existir un remanente de agua que garantice el proceso de succión de las bombas, mas un margen de volumen para el llenado de tuberías; se considero entonces una capacidad equivalente a 1,5 este volumen.

Por limitaciones del espacio disponible, se diseñó el tanque para construcción bajo tierra, con muros en concreto y enchapado en baldosa, con la línea de drenaje conectada directamente con la red de alcantarillado local.

Para garantizar la seguridad del personal que opera el sistema, se diseñó una rejilla metálica seccionada en tres partes (desmontable), cada una contiene una lamina de acrílico con la cual se evita la caída de suciedades, sirve para tener un control visual del nivel del tanque, y además para evitar la evaporación del líquido y el aumento de la humedad en el laboratorio. La tapa (rejas+acrilicos) tiene ranuras para la salida de la tubería de succión de las bombas y para el ingreso de las líneas de retorno (bypass y descarga de tanques).

### **3.4.2 Válvulas de regulación**

Para garantizar la regulación del flujo en el sistema de calibración, además de la utilización de los variadores de frecuencia para controlar el flujo directamente sobre la bomba, se realizó una selección de válvulas de regulación manuales con el fin de realizar un ajuste fino del caudal y generar una contrapresión en las tuberías de medición que permitan el llenado completo de las mismas.

El dimensionamiento de estas válvulas se realizó basado en los Cv suministrados por lo fabricantes, contemplando que la caída de presión a través de este elemento, en su estado “full open”, en relación con la caída total de presión del sistema a máximo caudal, se encuentre en el rango de 10% al 30%<sup>19</sup>.

Las válvulas de regulación que se seleccionaron son válvulas de globo, en los tamaños de 2” (Cv = 45) y 3” (Cv = 110) de la marca CRANE y una válvula de aguja de 1” (Cv = 12) de la marca Dwyer-WEAndersson, para un ajuste más exacto en los bajos caudales.

---

<sup>19</sup> DONAL W. Bean. Selección de Válvulas de Alto Rendimiento. En GREENE. Richard W. Válvulas: Selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill. 1992, p 42.

Tabla 17. Características Técnicas Válvulas de Regulación

VÁLVULA DE GLOBO MANUAL	
<b>MARCA</b>	CRANE
<b>MODELO</b>	Cast Steel Globe Valves - 143-XU
<b>TAMAÑOS</b>	2 [in]y 3[in] – Bridas ANSI 150
<b>CUERPO</b>	Acero Fundido ASTM-216 WCB
<b>BONET</b>	API Trim 8 – CR13



VÁLVULA DE AGUJA MANUAL	
<b>MARCA</b>	DWYER – WE Andersson
<b>MODELO</b>	HNV-SSS36B
<b>TAMAÑO</b>	1 [in] - Roscado NPTF
<b>CUERPO</b>	316 SS
<b>EMPAQUETADURA</b>	PTFE



Fuente. El Autor.

Para la ubicación de estas válvulas se diseñó el arreglo de tuberías y accesorios mostrado en la figura 28. Diseñado lo más compacto posible por cuestiones de espacio disponible y fabricado en acero inoxidable 304, para evitar problemas de corrosión y deterioro en el tiempo de este sistema; Se ubicaron las válvulas en paralelo, con la finalidad de seleccionarlas dependiendo del caudal a establecer.

Figura 27. Sistema de Regulación Manual.- CAD



Fuente: El Autor.

### 3.4.3 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo es el encargado de generar el flujo de agua a través del sistema de tuberías y del medidor bajo prueba con el fin de realizar el proceso de calibración. Este sistema de bombeo debe garantizar la entrega del caudal en un rango de 1 L/min hasta 1400 L/min y estabilidad en el mismo.

Las bombas centrifugas se diseñan para un punto de funcionamiento, en lo referente a capacidad y carga total que garantiza la máxima eficiencia. Si no se trabajan en este punto se reduce la eficiencia del equipo, y se generan problemas en el funcionamiento de la bomba y grandes gastos económicos<sup>20</sup>.

Como el banco de calibración se diseñó para tener la capacidad de calibrar medidores desde ½" hasta 3" con el fin de abarcar el rango de caudales desde 1 L/min a 1400L/min, se tienen distintos escenarios que se deben contemplar para realizar el análisis hidráulico y poder seleccionar las bombas que garanticen la entrega del caudal de manera eficiente.

#### *Análisis Hidráulico*

En general, la bomba debe aplicar al líquido una energía formada por los siguientes componentes conocidos como carga estática y carga de fricción.

#### *Carga Estática*

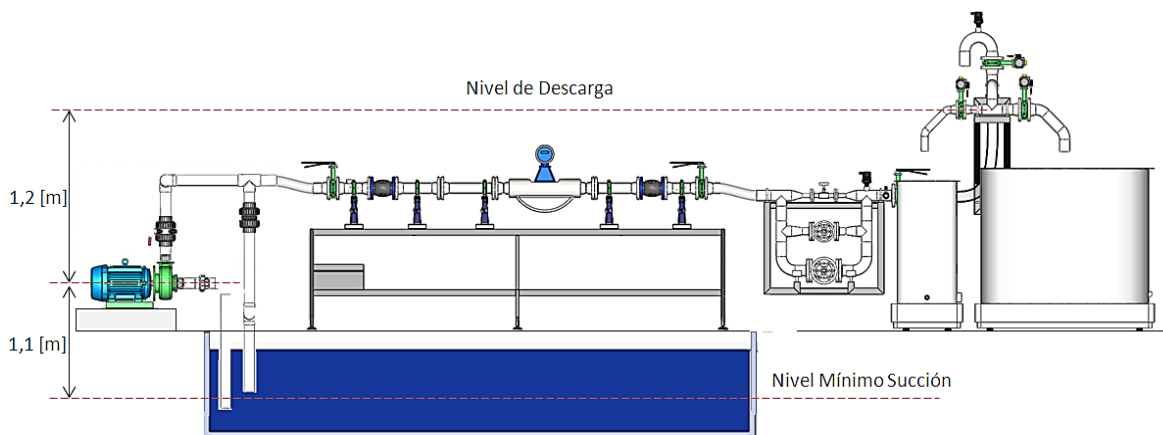
Considerando el sistema hidráulico del banco de calibración (*Figura 29*), se tiene el nivel de succión debajo de la línea central de la bomba, y el nivel de descarga determinado por la máxima altura de descarga del chorro libre.

En el caso más crítico del proceso de calibración, cuando se evaluó el punto de máxima capacidad del banco (1400 L/min), el tanque de almacenamiento estará en su nivel mínimo, presentándose la máxima carga estática del sistema.

---

<sup>20</sup> DOOLIN, Jhon H. Selección de las bombas para reducir costos de energía. En: KENNETH J. Bombas: Selección, uso y mantenimiento. McGraw Hill. 1992, p 26-29.

Figura 28. Carga Estática y Circuito Hidráulico



Fuente: El Autor.

Para efectos de los cálculos y del proceso de selección del sistema de bombeo, se asume la carga estática como:

$$H_{est} = 2,3 \text{ m}$$

### *Carga De Fricción*

Para el sistema hidráulico del banco de calibración se presentan principalmente 3 escenarios, correspondientes al arreglo de tuberías de medición de 1", 2" y 3", donde se presentan variaciones en los diámetros, longitudes de las tuberías y donde se agregan o retiran accesorios.

La red de tuberías esta compuesta por 2 secciones de materiales diferentes; la primera sección, constituida por la succión y la descarga de las bombas, se construirá de PVC, con el fin de minimizar las pérdidas en la succión de las bombas. La segunda sección, compuesta por las tuberías de los tramos de medición, el sistema de regulación y el sistema de válvulas desviadores de flujo, es en acero inoxidable.

La tubería de PVC de 3" de diámetro nominal, RDE 21 para presión máxima de operación de 200 [psi] y con una rugosidad de 0.0015 [mm]. La tubería de acero inoxidable de diámetro 1", 2" y 3", con una rugosidad interna de 0.05 [mm].

La estimación de las pérdidas se llevo a cabo utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 15) y la ecuación de Colebrook (Ecuación 16) para el cálculo del factor de fricción. Los coeficientes de resistencia de los diferentes accesorios se tomaron de la publicación de CRANE: technical paper 410<sup>21</sup>.

$$H_f = f \frac{Lv^2}{2Dg} + K \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{1}{f} = -2 \cdot \text{Log} \left[ \frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot f} \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

La caída de presión a través de las válvulas reguladoras se determino a partir de la relación:

$$Q = Cv * \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde el Cv es el suministrado por el fabricante de las válvulas.

Las perdidas de presión en función del caudal del medidor bajo prueba, se obtuvieron con la información suministrada por el fabricante Micro motion en la aplicación Product Selector de su sitio Web<sup>22</sup>, se realizo la estimación de las perdidas con la serie de medidores Elite CFM 25, CFM 50, CFM 100 y CFM 200.

<sup>21</sup> CRANE, División de Ingeniería. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw Hill, 1987. P A46-A49.

<sup>22</sup><http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/micromotion/coriolis-flow-density-meters>

El análisis se llevo a cabo calculando el aporte de cada subsistema a la carga friccional y hasta los caudales máximos para cada escenario. Las perdidas de presión de cada subsistema se determinaron en metros de columna de agua.

Subsistemas:

- ✚ Bombeo.
- ✚ Tramos de Medición.
- ✚ Regulación.
- ✚ Distribución.
- ✚ Válvula Reguladora.
- ✚ Medidor Bajo Prueba

$$Hl = H_B + H_{Tub} + H_{Reg} + H_{Dis} + H_{VR} + H_{Med} \quad \textbf{Ecuación 18}$$

Para cada sistema se determino el factor de fricción K de cada accesorio y se obtuvo un total dependiendo de la cantidad de accesorios y para los tramos de tubería rectos se determino el K equivalente. En el cálculo de la perdida de presión se empleo la ecuación 19, donde el valor de K, es la suma del K de los accesorios y del K equivalente de las tuberías rectas.

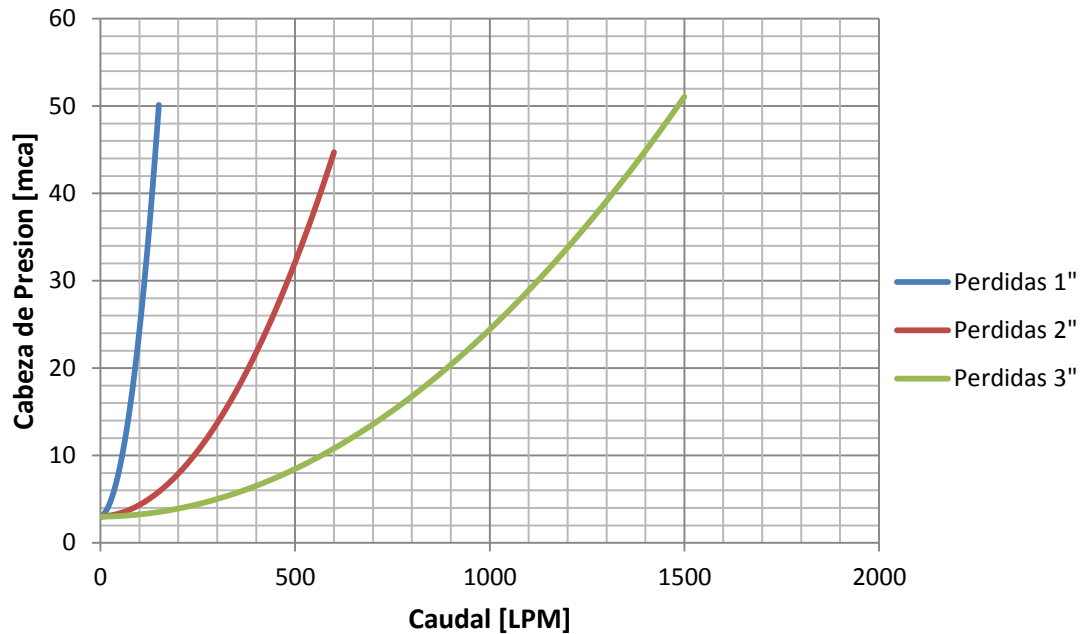
$$H_i \text{ m} = 22,96 \cdot \frac{K \cdot Q \text{ Lpm}^2}{d \text{ mm}^4} \quad \textbf{Ecuación 19}$$

Implementando las ecuaciones 18 y 19 en hojas de cálculo de Excel, expresándolas en función del caudal que atraviesa cada escenario de calibración, y considerando además para cada escenario, las longitudes, los diámetros y los

accesorios por donde circulaba el agua en el proceso de calibración, se genero la curva de fricción del sistema para cada uno de ellos.

Figura 29. Perdas de Presión Escenarios de Calibración

### Curvas de Friccion de Sistema



Fuente: El Autor.

Además de disponer del comportamiento de las perdidas de presión en el sistema, otro parámetro que se debe tener presente para la selección del sistema de bombeo, es el NPSH disponible en el sitio dispuesto para la ubicación de las bombas.

La carga neta positiva de succión disponible ( $NPSH_d$ ) se determino de la siguiente manera:

$$NPSH_d = \frac{2,31 \cdot (P_s - P_v)}{SG} + Z + h_f \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$P_s =$  Presion sobre la superficie del liquido [Psia]

$P_v =$  Presion de Vapor del liquido [Psia]

$Z =$  Carga estatica [ft]

$h_f =$  Perdidas por friccion [ft]

Para las condiciones del laboratorio de 20°C de temperatura y 908 mbar de presión absoluta, considerando la ubicación de las bombas y la cota mínima del tanque de almacenamiento de agua y las pérdidas a caudal máximo, el valor del  $NPSH_d$  es:

$$NPSH_d = \frac{2,31 \cdot (13,1723 - 0,3392)}{1} - 3,609 - 7,804 = \mathbf{18,23 [ft]}$$

La potencia requerida para la propulsión del sistema de bombeo se determino empleando la siguiente ecuación, con las condiciones a máximo caudal, la carga del sistema a esa condición en el escenario de calibración de 3" y asumiendo una eficiencia aproximada del 70%.

$$BHP = \frac{Q \text{ gmp} \cdot H[ft]}{3960 \cdot \eta} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$BHP = \frac{369,8409 \cdot 147,2437}{3960 \cdot 0,7} = \mathbf{19,645 Hp}$$

Basados en la información de las curvas de carga del sistema, el NPSH y la potencia requerida, se procedió a realizar el análisis con las curvas suministradas por los fabricantes de bombas centrifugas. Se examinaron las curvas presentadas

por lo fabricantes Barnes, IHM y Pedrollo y las características técnicas de cada bomba.

El proceso de selección para el sistema de bombeo, contemplo en uso de bombas centrifugas con variadores de frecuencia, debido a los distintos escenarios de calibración y las variaciones en el flujo deseado. Además de las ventajas que trae el empleo de los variadores al modificar la curva de funcionamiento de la bomba, se debe tener cuidado con las velocidades del motor. Abajo del 50% de la velocidad nominal, el motor reduce su capacidad de refrigeración y en sistemas de bombeo, genera bajas presiones y cero conducción de fluido; el caso contrario de velocidades altas, genera sobrecarga elevada y la salida de funcionamiento del sistema por sobrecorriente<sup>23</sup>.




De cada fabricante se preselecciono una bomba que garantizara la máxima demanda de flujo del banco de calibración, seguidamente se redujo su capacidad al 50% y en este punto se selecciono otra de menor capacidad, para poder alternar el uso de cada bomba dependiendo del caudal a establecer.

A continuación se presenta el cuadro comparativo de las bombas preseleccionadas de cada marca, las cuales se acoplaban mejor a los requerimientos de carga de sistema y las curvas de comportamiento de cada una de ellas, comparadas con la carga del sistema.

---

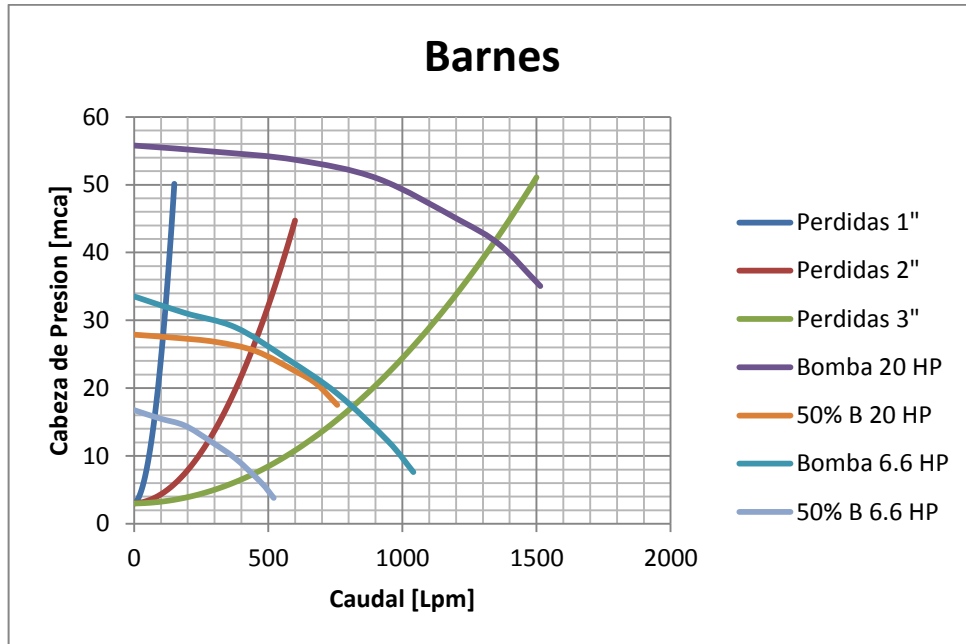
<sup>23</sup> WEG. Selección y aplicación del variadores de velocidad. Bogotá.

Tabla 18. Selección Bombas Centrifugas

SELECCIÓN DE BOMBAS CENTRIFUGAS						
Marca	BARNERS		PEDROLLO		IHM	
Modelo	GSM 2B-20	AE 3 66-3	F 50/200B	F50/160C	5 x 20 - 20TW	4 x 13 - 7,5TW
Tipo	Centrifuga Alta Presión	Centrifuga Autocebante	Centrifuga	Centrifuga	Centrifuga Eurolinea	Centrifuga Eurolinea
Potencia [hp]	20	6,6	20	5,5	20	7,5
Succión x Descarga	2-1/2" x 2"	3" x 3"	2-1/2" x 2"	2-1/2" x 2"	2-1/2" x 2"	2-1/2" x 1-1/2"
Conexión	Trifásico -60 Hz	Trifásico -60 Hz	Trifásico - 60 Hz	Trifásico - 60 Hz	Trifásico - 60 Hz	Trifásico - 60 Hz
Voltaje	220/440	220/440	220	220	220/440	220/440
Amperaje	58,4/29,2	19/9,5	54	17,7	50,3/25,15	19,1/9,55
Marca Motor	Siemens / WEG	Siemens / WEG	PEDROLLO	PEDROLLO	WEG	WEG
Hmax [mca]	57	34	52	27	64	36
Qmax [LPM]	1495	1040	1700	1000	1510	757
RPM	3495	3495	3450	3450	3500	3500
Numero Etapas	1	1	1	1	1	1
NPSH req [ft]	16	20	20	14	20	20
Imagen						
Precio	\$ 3.294.000	\$ 1.443.000	\$ 4.757.000	\$ 2.240.000	\$ 2.090.000	\$ 3.520.000
Precio Total	<b>\$ 4.737.000</b>		<b>\$ 6.997.000</b>		<b>\$ 5.610.000</b>	
Distribuidor	Barnes de Colombia S.A		Pedrollo Colombia		Ignacio Gómez - IHM S.A	
Tiempo Entrega	2 Semanas		8 Semanas		2 Semanas	

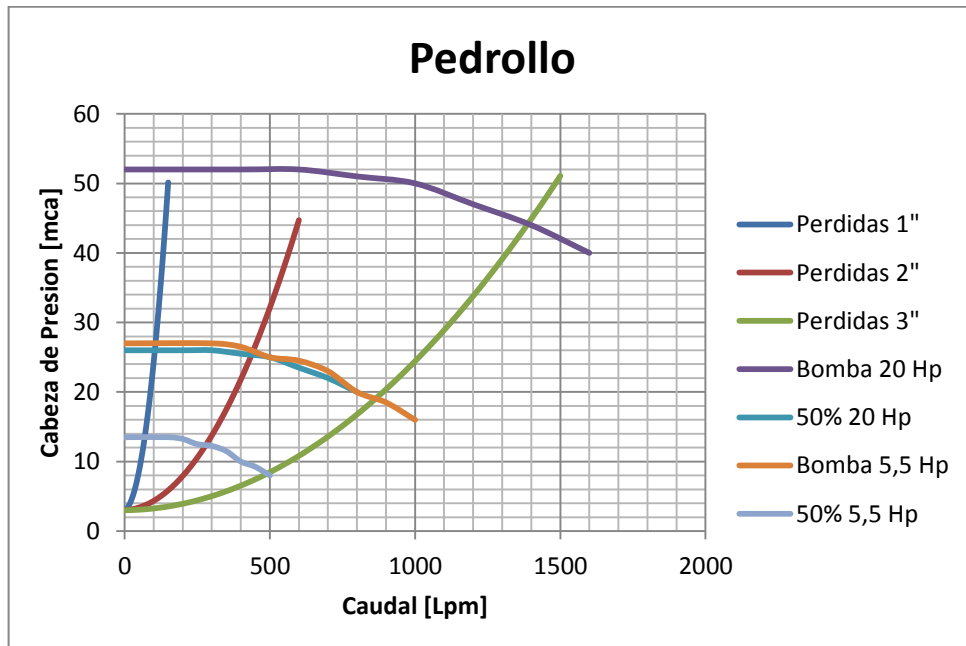
Fuente: El Autor

Figura 30. Comportamiento Bombas Barnes



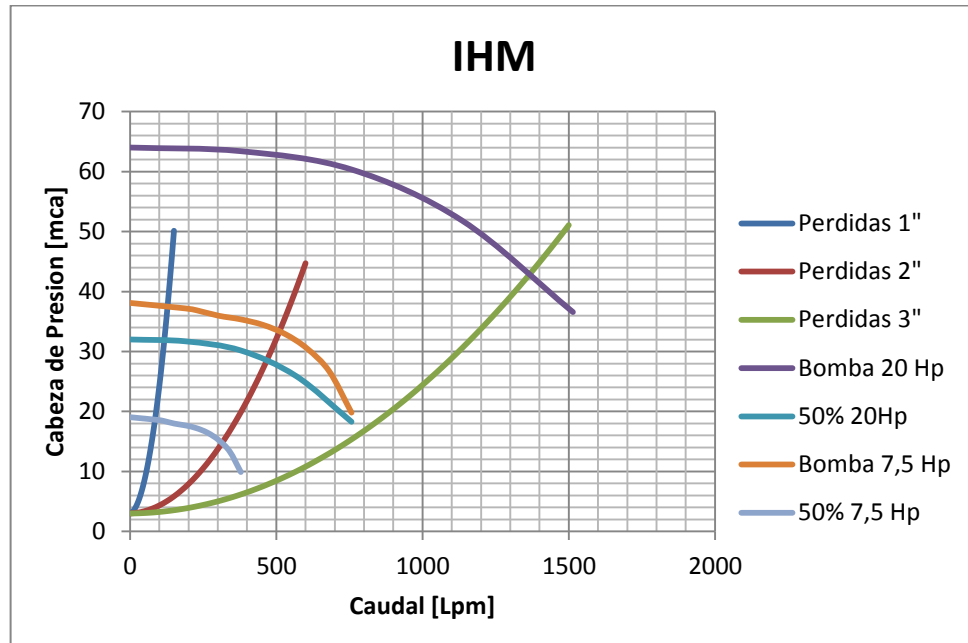
Fuente: El Autor.

Figura 31. Comportamiento Bombas Pedrollo



Fuente: El Autor.

Figura 32. Comportamiento Bombas IHM



Fuente: El Autor.

Basados en la información anterior, se seleccionaron las bombas de marca Barnes, ya que presentan características intermedias en cuanto a presión máxima generada y caudales alcanzados, en relación con las otras marcas, además poseen bajo costo de adquisición, bajo tiempo de adquisición y buen soporte técnico a en todo el país, por ser una marca nacional.

#### 3.4.4 Variadores de frecuencia




El variador es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Para la selección de los variadores de frecuencia se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- ✚ Potencia de la carga
- ✚ Corriente de la carga
- ✚ Entrada análoga para lazo de control
- ✚ Trabajo con par cuadrático
- ✚ Rampas de ascenso y descenso
- ✚ Evaluación de condiciones de trabajo con bombas
- ✚ Precio

Los tres modelos preseleccionados fueron los siguientes:

Tabla 19. Selección Variadores de Frecuencia

			
<b>Fabricante</b>	<b>ABB</b>	<b>Siemens</b>	<b>Danfoss</b>
<b>Modelo</b>	ASC 500	Micromaster 440	AQUA VLT
<b>Potencia Salida[Hp]</b>	20 – 7,5	20 – 7,5	20 – 7,5
<b>Corriente de Salida [A]</b>	59,4 – 24,2	54 – 22	59,4 – 24,2
<b>Entrada Análoga</b>	Si	Si	Si
<b>Trabajo Par Cuadrático</b>	Si	Si	Si
<b>Rampa Ascenso y Descenso</b>	Si	Si	Si
<b>Trabajo con Bombas</b>	No	No	Si
<b>Disponibilidad</b>	7 días	Inmediata	5 días
<b>Precio</b>	\$ 7'350.000	\$ 5'974.000	\$ 7'323.000

Fuente: El Autor.

El variador seleccionado fue el Danfoss Aqua VLT debido que permite realizar una evaluación de condiciones de trabajo para bombas con agua, además de tener un precio y una disponibilidad dentro del margen establecido en el desarrollo del proyecto.

Figura 33. Sistema de Bombeo – CAD



Fuente: El Autor.


## 3.5 SISTEMAS AUXILIARES

### 3.5.1 Sistema neumático

El sistema neumático en el banco tiene la función principal de suministrar aire a presión a los actuadores neumáticos de las válvulas desviadoras de flujo. En las instalaciones del laboratorio del CDT de Gas se dispone de una línea neumática central.

Basados en el funcionamiento de los actuadores neumáticos, donde el aire ingresa y tiene contacto con todo el mecanismo, se presentan como requerimientos importantes que el aire se encuentre libre de polvo y condensados, y que además este sirva como medio para lubricar los componentes móviles del mecanismo interno del actuador. Para cumplir con estos requisitos, se selecciono una unidad de mantenimiento de aire, la cual comprende una etapa de filtración, una etapa de regulación y una etapa de lubricación.

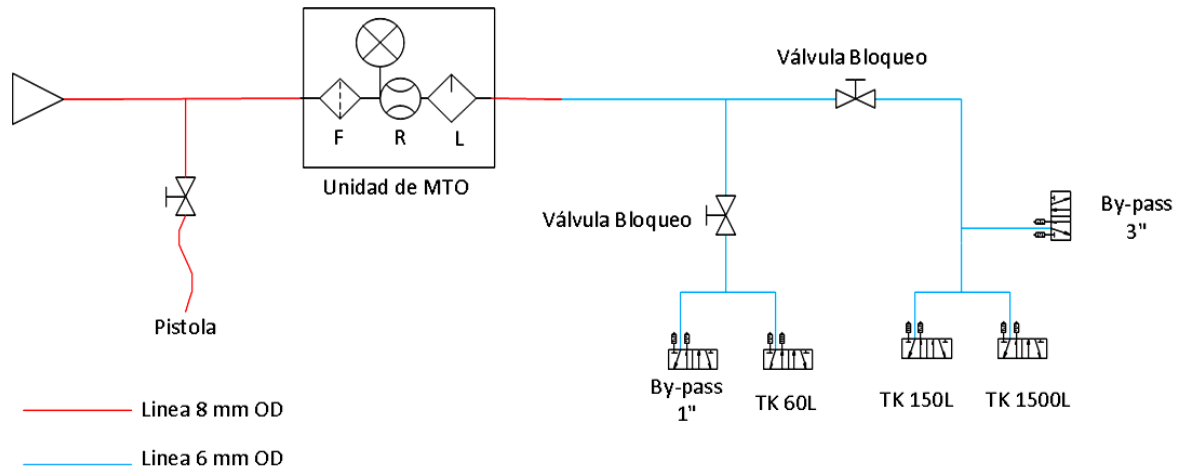
Tabla 20. Especificaciones Unidad de Mantenimiento Chelic NBC-300-A

Ítem	Especificación	
Tamaño puertos	3/8" NPT	
Caudal	1350 L/min (ANR)	
Rango Presión	50-850 Kpa	
Grado Filtro	5 um	
Volumen Aceite	90 cc	

Fuente: El Autor.

El diseño de del circuito neumático se realizo de acuerdo a la disposición final de las válvulas desviadores de flujo, con el fin de determinar los accesorios requeridos para su instalación.

Figura 34. Circuito Neumático



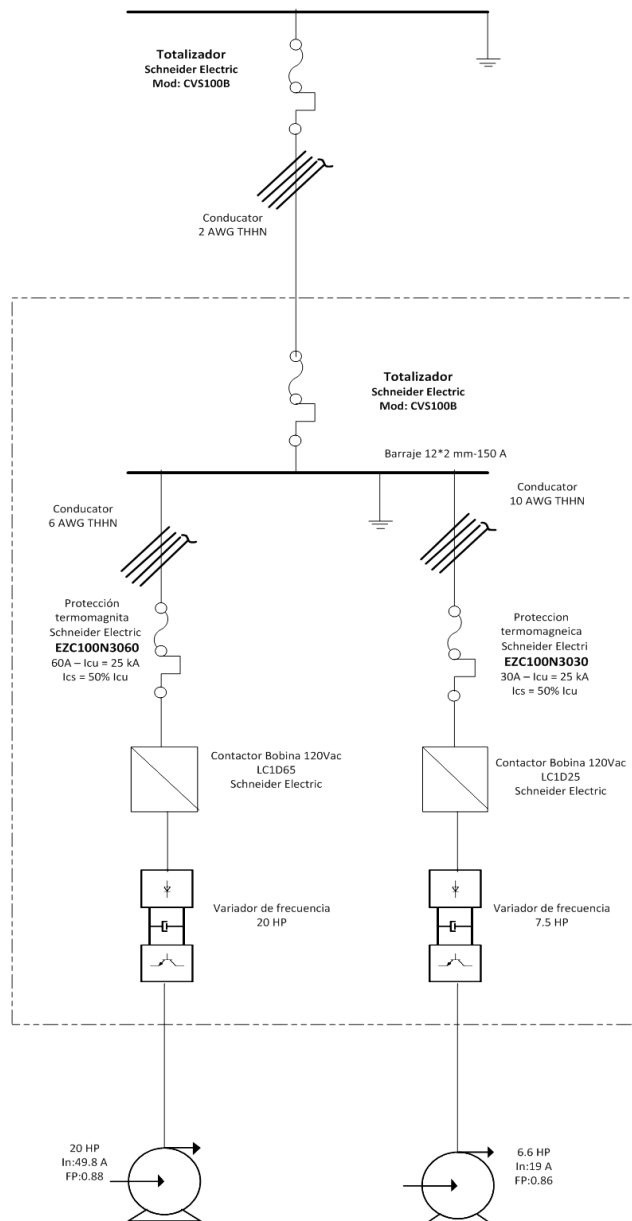
Fuente: El Autor.

Además se ubicó de una pistola para suministro de aire presurizado con fines de limpieza y mantenimiento de equipos.

### 3.5.2 Sistema eléctrico

Este sistema tiene la función de suministrar la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento de las bombas centrífugas. A continuación se encuentra el diagrama eléctrico del banco:

Figura 35. Circuito Eléctrico



Fuente: El Autor.

Para la selección de los componentes del sistema eléctrico del banco se tuvieron presentes las indicaciones del código eléctrico colombiano (NTC-2050).

### **3.6 INSTRUMENTACIÓN, ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL**

La instrumentación en el banco de calibración tiene la función de establecer las condiciones operativas del mismo, en lo referente a presión y temperatura del fluido de calibración y las condiciones ambientales del laboratorio. Además para el óptimo funcionamiento en el proceso de calibración de todos los componentes que constituyen el banco, como los variadores de frecuencia, las válvulas automáticas y el medidor másico bajo prueba, se establece el desarrollo de una estrategia de automatización, empleando una plataforma de control y adquisición de datos adecuada, con un computador dedicado.

#### **3.6.1 Instrumentación requerida**

Para determinar las condiciones operativas del banco de calibración, en lo referente a presión, se consideran dos (2) transmisores de presión manométrica, ubicados aguas arriba y agua abajo del medidor bajo prueba (MUT<sup>1</sup>).

Para la presión atmosférica, se usará un instrumento dedicado que mida esta variable, y para completar la determinación de las condiciones ambientales, se empleará un termo-higrómetro.

En relación a la temperatura del fluido de calibración, y de operación del MUT, se estableció la utilización de 2 sensores de temperatura ubicados en las tuberías aguas arriba y aguas abajo del medidor, con una longitud de 3 pulgadas para ser instalados en dichos tramos de tubería; y de 3 sensores de temperatura en los tanques de almacenamiento con una longitud de 8 pulgadas para obtener una temperatura representativa de toda el agua acumulada, al momento de pesarla.

---

<sup>1</sup> MUT: Meter Under Test

En general se obtiene el siguiente listado de instrumentos a seleccionar.

Tabla 21. Listado de Instrumentación Requerida

Instrumento	Abreviatura	Variable a medir	Ubicación
<b>Transmisor de presión manométrica</b>	PT1	Presión aguas arriba MUT	Tramo Instrumentación 1
	PT2	Presión aguas abajo MUT	Tramo Instrumentación 2
<b>Barómetro</b>	PT3	Presión Atmosférica	Panel de control
<b>Transmisor de temperaturas</b>	TT1	Temperatura aguas arriba MUT	Tubería Instrumentación 1
	TT2	Temperatura aguas abajo MUT	Tubería Instrumentación 2
	TT3	Temperatura agua sistema pesaje	Tanque Recolección
	TT4	Temperatura agua sistema pesaje	Tanque Recolección
	TT5	Temperatura agua sistema pesaje	Tanque Recolección
<b>Termo-Higrómetro</b>	TH1	Temperatura y Humedad ambientales	Panel de Control

Fuente: El Autor.


Para la selección de la instrumentación existen diferentes criterios que se deben considerar, entre estos se hallan el tipo de señal que entrega el instrumento, la clase, la deriva, que son características importantes en el banco de calibración porque están relacionadas con el desempeño metrológico y la estimación de incertidumbre ( Anexo 1). Además se encuentra un criterio no menos importante, el costo, ya que siempre se busca obtener un instrumento con el mejor desempeño metrológico a un menor precio. A continuación se muestra un listado de los posibles instrumentos y la selección definitiva.

### 3.6.1.1 Presión Manométrica

El rango de los instrumentos de presión manométrica es de 0 a 100 psi; este rango se determinó basado en la presión máxima del sistema (80 Psi), suministrada por la bomba centrífuga de 20 Hp cuando se bloque su descarga.

Para estos instrumentos se evaluaron los siguientes transmisores de presión tipo industriales.

Tabla 22. Selección Instrumentos de Presión Manométrica



Fabricante	WIKA	DWYER	ASCHCROFT
Modelo	S-10	626-10	A2
Alcance	0- 100 psi	0 – 100 psi	0-100 psi
Clase	0,5% F.S	0,25% F.S	0.25% F.S
Deriva	$\pm 0,25\%$ F.S /año	$\pm 1\%$ F.S /año	$\pm 0,25\%$ F.S /año
Salida	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA
Precio	\$292 USD	\$153 USD	\$380 USD

Fuente: El Autor.




Entre las tres opciones presentadas, se selecciono el trasmisor de presión de marca Dwyer, ya que es de buena clase y es la opción más económica; aunque su estabilidad no es la mejor, en las estrategias de aseguramiento metrológico del CDT de GAS, estos instrumentos se calibran semestralmente, por lo que la desviación se mantiene bajo control.

### 3.6.1.2 Presión Absoluta

El banco de calibración requiere un instrumento para medir presión absoluta en un rango aproximado desde 800 hasta 1100 mbar. Esta variable se emplea para determinar la densidad del aire y por ende influye en la estimación de la

incertidumbre del proceso de calibración. Para este instrumento se tienen las siguientes opciones:

Tabla 23. Selección Instrumentos de Presión Absoluta

			
<b>Fabricante</b>	<b>HONEYWELL</b>	<b>DWYER</b>	<b>WIKA</b>
<b>Modelo</b>	HPB200	626-01	S-10
<b>Alcance</b>	500- 1200 mbar	0 – 2068,4 mbar	0 – 2068,4 mbar
<b>Clase</b>	0,36 mbar	10,34 mbar	5,171 mbar
<b>Deriva</b>	$\pm 0,25$ mbar/año	$\pm 20,68$ mbar/año	$\pm 4,14$ mbar/año
<b>Salida</b>	RS232	4-20 mA	4-20 mA
<b>Precio</b>	\$995 USD	\$178 USD	\$374 USD

Fuente: El Autor.

La selección de este instrumento se realizó con base en el análisis de incertidumbre y en la contribución de la densidad del aire en el mensurando de calibración (error), al variar las características del medidor de presión absoluta.

Tabla 24. Contribución de la densidad del aire en el mensurando

<b>Instrumento</b>	<b>Contribución</b>
<b>Honeywell</b>	0,0025%
<b>Dwyer</b>	0,045%
<b>Wika</b>	0,0062 %

Fuente: El Autor.




El dicho análisis, se noto que la contribución de la densidad es muy baja comparada con la de las demás variables del modelo matemático con cualquier instrumento, por tal razón la selección del barómetro se baso en aspectos económicos y se escogió el instrumento de marca Dwyer.

### 3.6.1.3 Temperatura

Los instrumentos usados para medir temperatura en el banco trabajaran a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. Esta variable también afecta la incertidumbre de la calibración, en la determinación de la densidad del agua.

En la siguiente tabla, se presentan los instrumentos analizados; se seleccionaron sensores de temperatura tipo RTD, ya que son más exactas que otro tipo de instrumentos (termocuplas, termistores) en el rango de temperaturas en el cual opera el laboratorio.

Tabla 25. Selección Instrumentos de Temperatura

			
<b>Modelo</b>	<b>TTW</b>	<b>Mist 22</b>	<b>R3T185L-484</b>
<b>Fabricante</b>	Dwyer	Temperature & Process instruments	Pyromation
<b>Alcance</b>	-40 a 150 ° C	-50 a 200 ° C	-51 a 160 ° C
<b>Clase</b>	0,3 ° C	0.25 ° C	0.14 ° C
<b>Deriva</b>	No reportada	±0,25 ° C / Año	±0,1 ° C / Año
<b>Salida</b>	4 - 20 mA	4-20 mA	4-20 mA
<b>Sensor</b>	Pt100	Pt100	Pt100
<b>Precio</b>	\$ 200 USD	\$ 248 USD	\$ 198 USD


Fuente: El Autor.

Se seleccionó el transmisor de temperatura fabricado por Pyromation ya que poseen la mejor clase de los tres instrumentos, su deriva es pequeña y representa la mejor opción económica. Y en términos de la incertidumbre es obviamente la que genera la menor contribución.

#### 3.6.1.4 Humedad.

La humedad también influye en la determinación de la densidad del aire, pero en menor proporción, y su contribución en la incertidumbre de la calibración de los medidores másicos, es despreciable; por tal razón la selección de este instrumento se realizó por cuestiones económicas y de facilidad para obtener su medición. Se seleccionó entonces el siguiente instrumento marca Dwyer, que trae un *display* LCD de indicación.

Tabla 26. Selección Instrumento de Humedad



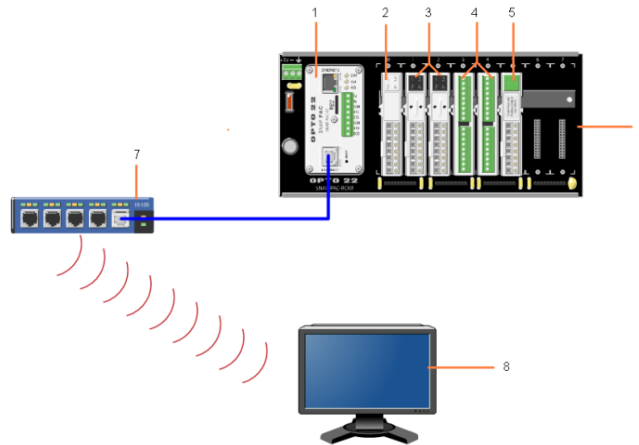
<b>Modelo</b>	<b>RHP-W</b>
<b>Fabricante</b>	Dwyer
<b>Alcance</b>	0 a 100 %RH
<b>Clase</b>	± 2 %RH
<b>Deriva</b>	1% RH /year
<b>Salida</b>	4 - 20 mA + Display
<b>Precio</b>	\$ 147 USD

Fuente: El Autor.

#### 3.6.2 Plataforma de control y adquisición de datos

La herramienta utilizada para desarrollar la automatización del banco es SNAP PAC SYSTEM de la empresa Opto 22, el cual es un sistema integrado de hardware y software para el control industrial, monitorización remota y adquisición de datos. El sistema consta de controlador programable, un *router* y módulos de entrada y salida. En la siguiente gráfica se especifica el sistema.

Figura 36. Plataforma de Control y Adquisición de Datos



Fuente: El Autor.

- 1: Controlador programable R1.
- 2: SNAP IDC5-FAST: Entrada de pulsos del medidor bajo prueba.
- 3: SNAP OAC5-i: Conmutación de electroválvulas.
- 4: SNAP AIMA 8: Entradas análogas (instrumentación).
- 5: SNAP AOA-23: Salida de 4-20 mA para control de variadores de frecuencia.
- 6: SNAP PAC-RACK-8: RACK de montaje de los módulos de entrada y salida.
- 7: Router. Equipo conectado para transmitir señal *wireless* entre PC y controlador
- 8: Computador portátil.

## 3.7 ESTRUCTURAS Y SOPORTES

### 3.7.1 Estructura Principal

La estructura principal será la encargada de soportar en su totalidad el medidor en calibración, las tuberías de medición, las válvulas instaladas aguas arriba y aguas abajo del medidor, entre otros. Además debe tener la funcionalidad de albergar las tuberías de medición que no se encuentren en uso, las herramientas mecánicas y los accesorios utilizados en los montajes, disponer de un espacio para almacenar y equilibrar térmicamente con la temperatura del laboratorio los medidores que van a ser calibrados. En general los requisitos que este diseño debe cumplir son:

- ✚ Soportar el peso total de los componentes anteriormente mencionados, lo cual sería de aproximadamente 400 kg.
- ✚ Compacta debido al poco espacio disponible en el laboratorio.
- ✚ Tener la facilidad para el montaje de distintos tamaños de medidores.

Para satisfacer los requerimientos anteriores se planteó el diseño mostrado en la figura 37. Toda la estructura será pintada de color negro, con pintura electrostática

### **3.7.2 Estructura Sistema de Regulación**

Esta estructura tiene la función principal de soportar las válvulas de regulación y las tuberías acopladas a ellas, el peso aproximado del sistema de regulación es de 90 Kg. Debe anclarse a la pared y garantizar buena estabilidad al SR.

Toda la estructura será pintada de color negro, con pintura electrostática y su diseño se muestra en la figura 38.

### **3.7.3 Estructuras Sistemas de Distribución.**

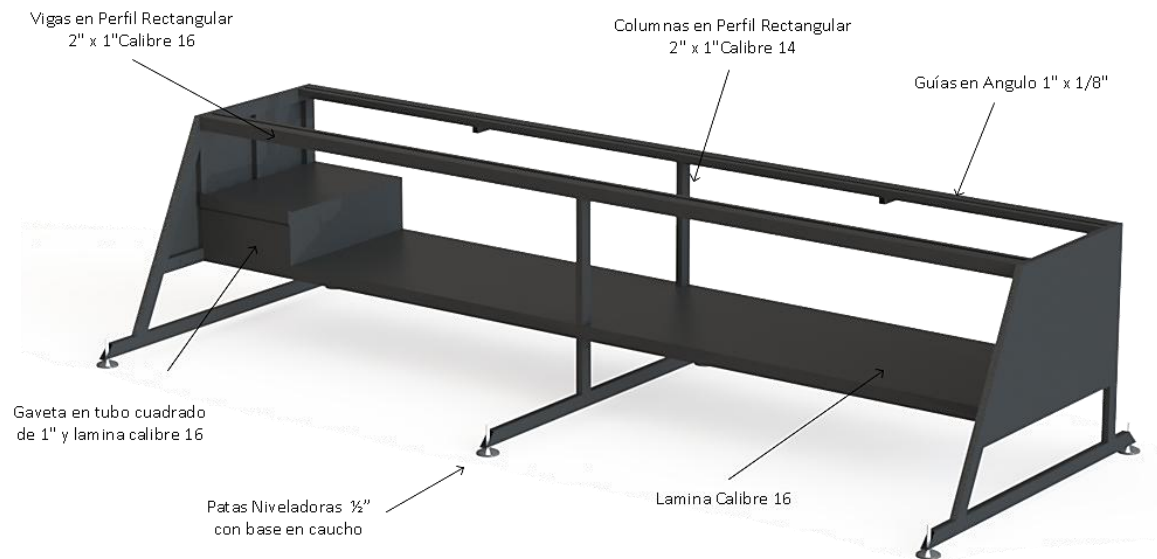
Estas estructuras deben soportar los sistemas de válvulas desviadoras, el peso aproximado del SVD1 es de 75 Kg y el del SVD2 es de 15Kg. Las estructuras serán pintadas de color negro, con pintura electrostática y su diseño se muestra en las figuras 39 y 40 respectivamente.

La estructura para el SVD1 debe ser anclada a la pared, y brindar rigidez al sistema. La estructura para el SVD2 debe ser anclada al piso, no ocupar mucho espacio y proporcionar estabilidad.

### 3.7.4 Soportes tuberías de medición

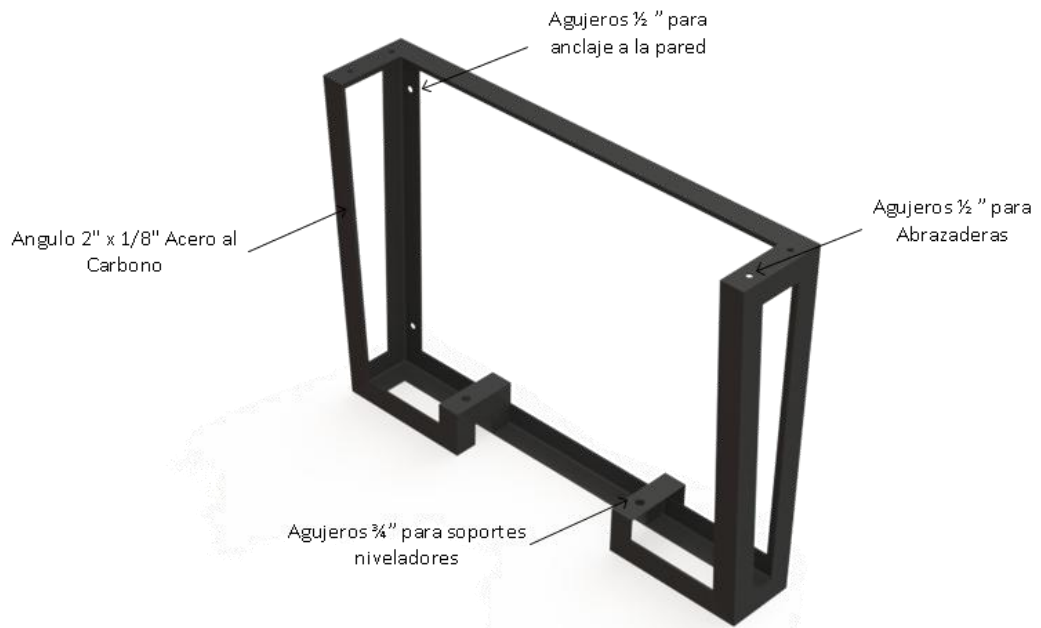
Esta estructura tiene la función de brindar soporte a los tramos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor, las tuberías de instrumentación y el medidor bajo prueba, sobre la mesa principal. Debe tener la facilidad de desplazarse a lo largo de la mesa y de cambiar su elevación para dar facilidad al montaje de los distintos medidores a calibrar. Estas estructuras serán pintadas en azul, con pintura electrostática y su diseño se aprecia en la figura 41.

Figura 37. Estructura Principal – CAD



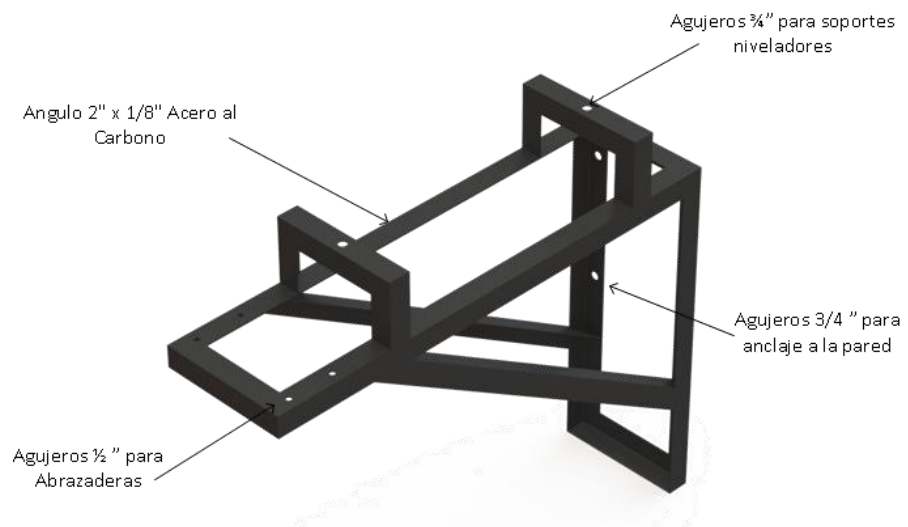
Fuente: El Autor.

Figura 38. Estructura de Soporte del SR - CAD



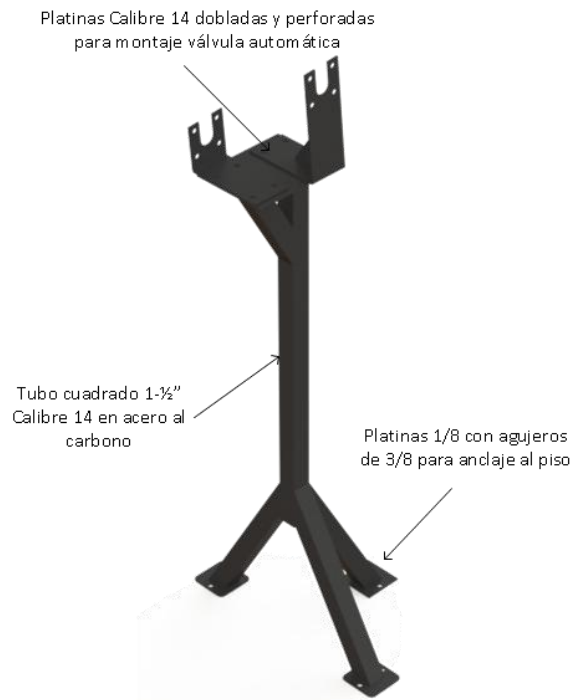
Fuente: El Autor.

Figura 39. Estructura de Soporte del SVD-1 – CAD



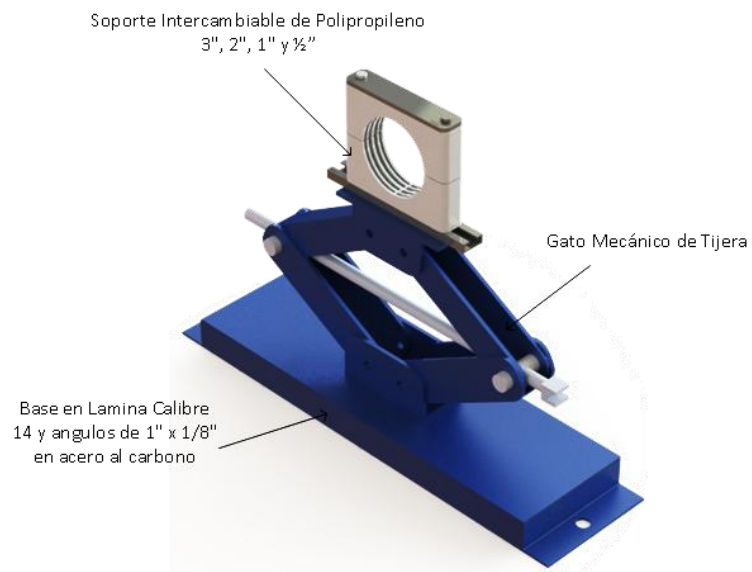
Fuente: El Autor.

Figura 40. Estructura de Soporte del SVD-2 - CAD



Fuente: El Autor.

Figura 41. Soporte Tuberías de Medición - CAD.



Fuente: El Autor.

El diseño definitivo del banco destinado a la calibración de medidores másicos tipo coriolis se aprecia en la siguiente figura.

Figura 42. Banco de Calibración - Modelo CAD



Fuente: El Autor.

## **4. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO**

En esta etapa del desarrollo del banco se realizó la adquisición de todos los equipos y materiales necesarios, se enviaron a fabricar las líneas de flujo y las estructuras de soporte, se realizaron las adecuaciones locativas requeridas y finalmente se efectuó la integración de todos los componentes y el montaje de la facilidad de calibración en el laboratorio del CDT de GAS. A continuación se describen las actividades desarrolladas.

### **4.1 ADECUACIONES FÍSICAS Y OBRAS CIVILES**

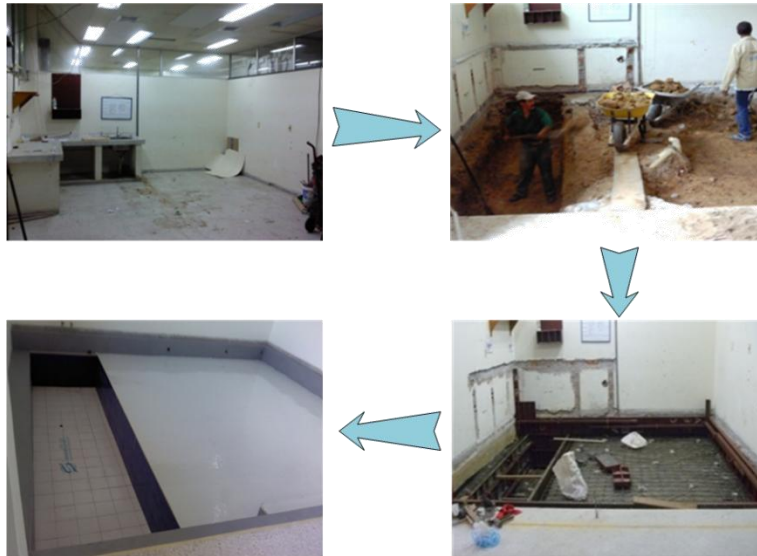
Las adecuaciones locativas llevadas a cabo en las instalaciones del laboratorio del CDT de Gas corresponden a la construcción del tanque de almacenamiento, descenso del nivel del piso del laboratorio, cimentación y apertura de orificios para las tuberías de succión y descarga del sistema de bombeo.

#### *Construcción del tanque y descenso del nivel del piso del laboratorio*

El descenso del nivel del piso del laboratorio se realizó con el fin de que en un posible fallo del sistema, el agua derramada quede limitada por esta área y no se disperse a las demás zonas del laboratorio. Otra razón para modificar el piso existente, fue la de reforzarlo, ya que para el caso de máximo funcionamiento, cuando el tanque TR3 este lleno, habrá sobre el piso una carga de aproximadamente 2 toneladas que se debe soportar.

El tanque de almacenamiento se construyó de acuerdo a las dimensiones anteriormente mencionadas. El proceso de construcción se evidencia en la figura 43.

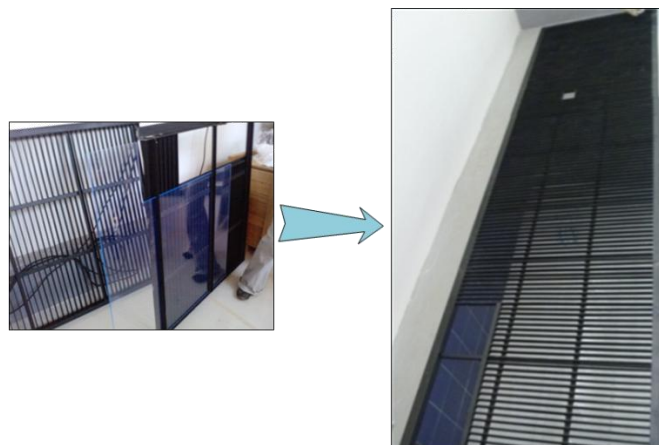
Figura 43. Adecuación del Área Disponible



Fuente: El Autor.

Las rejillas se fabricaron en tres tramos, en ángulo de 2" x 3/16" y platinas de 1" x 3/16", con base anticorrosiva y pintura negra. Las láminas de acrílico con espesor de 5 mm, se cortaron de acuerdo a las dimensiones finales de las rejillas.

Figura 44. Montaje Tapa del Tanque de Almacenamiento



Fuente: El Autor.

### *Obra Civil sistema de Bombeo*

La obra consistió en cambiar el concreto existente en el piso de la caseta de cilindros, por un concreto de mayor espesor y más resistente; además para el amarre de las bombas, se instaló una estructura metálica con los pernos de anclaje, inmersa en el nuevo concreto, con el fin de garantizar un buen soporte y reducir las vibraciones generadas.

Figura 45. Adecuaciones Cuarto de Bombas



Fuente: El Autor.

## **4.2 MONTAJE CIRCUITO HIDRAULICO**

La construcción de todo el circuito hidráulico del banco de calibración consta de la instalación de las tuberías de medición, del sistema de regulación, los sistemas de distribución y las mangueras entre cada uno de los sistemas anteriormente nombrados.

Se inicio el montaje con el anclaje a la pared de la estructura de soporte del sistema SVD-1 y del ensamble sobre ésta de las tuberías y válvulas automáticas,

que componen el SVD-1. Se ubicaron las válvulas, de tal manera que la línea de bypass se encuentre normalmente abierta, y las vías de descarga a tanque normalmente cerradas. La figura 46 muestra el montaje final de SVD-1.

Figura 46. Montaje SVD-1



Fuente: El Autor.

Seguidamente se efectuó el montaje del SVD-2; se ancló la estructura al piso del laboratorio, se realizó el ensamble de todos los niples, las 2 válvulas automáticas y los accesorios roscados. La disposición final del SVD-2 se observa en la figura 47.

También se realizó la instalación del sistema neumático, se ancló la unidad de mantenimiento de aire a la pared del laboratorio y se alimentaron los actuadores de las válvulas automáticas.

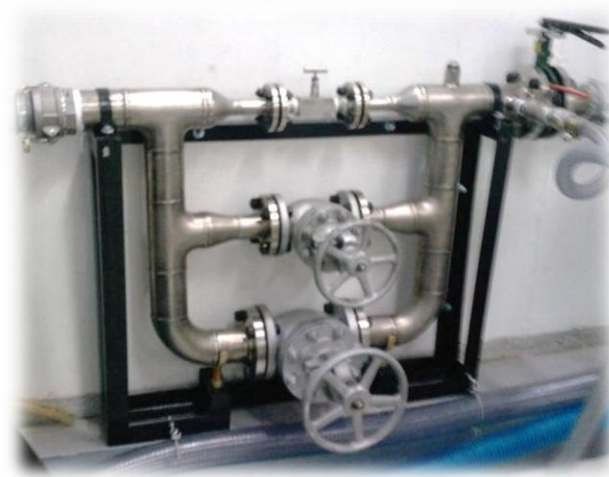
Figura 47. Montaje SVD-2



Fuente: El Autor.

En la instalación del sistema de regulación se ancló la estructura de soporte a la pared del laboratorio y se realizó el montaje entre bridas de las válvulas de regulación, empleando empaques flexitalicos para garantizar el sello en la unión. A continuación, en la figura 48 se aprecia la disposición final.

Figura 48. Montaje Sistema de Regulación



Fuente: El Autor.

Sobre la mesa principal se instalaron los soportes para tubería, con sus apoyos intercambiables de polipropileno; se realizó el montaje de los tramos fijos de la instrumentación, se instalaron las válvulas de mariposa manuales, las juntas de expansión en caucho y la válvula ventosa. Se emplearon empaques de neopreno para garantizar el sello entre las uniones bridadas. Este montaje se observa en la figura 49.

Figura 49. Montaje Tuberías de Medición



Fuente: El Autor.

La unión entre cada uno de los sistemas se realizó empleando la manguera transparente y acoples rápidos de aluminio para facilitar el montaje y el desmonte en caso de mantenimiento de cada uno de los sistemas.

Figura 50. Montaje Manguera Transparente



Fuente: El Autor.

### 4.3 MONTAJE SISTEMA DE GENERACIÓN DE FLUJO

El montaje del sistema de generación de flujo, consistió en la instalación de las bombas centrífugas con las respectivas tuberías de succión y descarga (*Figura 51*), y la acometida eléctrica (*Figura 52*).

Inicialmente se anclaron las bombas en el sitio destinado para ello, se emplearon tiras de neopreno entre la base de la bomba y el piso de concreto, con la finalidad de reducir la vibración generada por estos equipos en su operación.

Seguidamente para cada bomba se realizó el montaje de la succión, en tubería PVC presión RDE 2 de 3" con los accesorios correspondientes; se instaló una válvula de pie del mismo material, para garantizar que estos tramos de tubería no se vacíen cuando las bombas no se encuentran en funcionamiento, además se colocó en dichas válvulas una malla plástica para evitar el ingreso impurezas que perjudiquen la operación de las bombas.

La descarga de las bombas se realizó en tubería PVC de 3", con válvulas de bola manuales del mismo material y diámetro. Se anclaron los "pie de amigo" a la pared, para soportar dicha tubería con abrazaderas metálicas y tiras de neopreno.

La acometida eléctrica requerida para dar funcionamiento al sistema de bombeo, se instaló junto al sitio donde se ubicaron las bombas centrífugas. Se construyó una caja metálica ventilada para instalar todos los componentes eléctricos y los variadores de frecuencia y suministrar potencia al sistema de bombeo.

Figura 51. Instalación Bombas Centrifugas



Fuente: El Autor

Figura 52. Montaje Sistema Eléctrico



Fuente: El Autor

#### 4.4 MONTAJE SISTEMA DE REFERENCIA

El montaje del sistema de referencia comprendió la instalación y nivelación de las tres plataformas de pesaje sobre el piso del laboratorio, y la ubicación de los tres

indicadores correspondientes a cada una de ellas sobre un mesón de trabajo. También se colocaron los respectivos tanques de pesaje sobre cada una de las balanzas y se realizaron las respectivas conexiones de los desagües y de los termopozos. Este montaje se aprecia en la figura 53.

Figura 53. Montaje Final Sistema de Referencia



Fuente: El Autor.

#### **4.5 MONTAJE SISTEMA DE CONTROL**

Finalmente en el proceso constructivo, se realizó el montaje de la caja de control, empleando una estructura en pie de amigo anclada a la pared del laboratorio. Se procedió a realizar el respectivo cableado para controlar las válvulas automáticas y los variadores de frecuencia y adquirir los datos de la instrumentación, de las balanzas y de los pulsos del medidor bajo prueba. En la figura 54 se aprecia la distribución de la plataforma de control.

Figura 54. Plataforma de Adquisición de Datos y Control



Fuente: El Autor

El banco de calibración para medidores de flujo tipo coriolis construido se aprecia en la figura 55.

Figura 55. Montaje Final Banco de Calibración



Fuente: El Autor

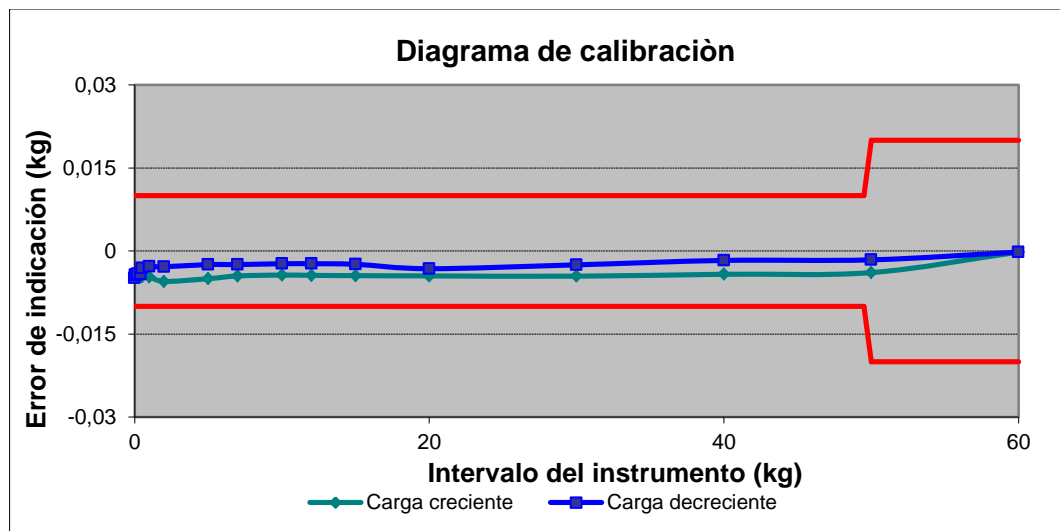
## 5. PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN

### 5.1 Calibración de las Balanzas

Este procedimiento se realizó luego de ubicar cada una de las balanzas en su sitio y de nivelar las plataformas de pesaje. Las balanzas de 60 Kg y de 150 Kg se calibraron en la corporación CDT de GAS, ya que la empresa dispone de varios juegos de pesas patrón trazables al instituto nacional de metrología. La balanza de 1500 Kg fue calibrada por la empresa Vansolix S.A con un procedimiento acreditado en cada uno de sus intervalos de operación.

El certificado de calibración INFC-12-BAL-097-1862 de la balanza de 60 Kg, establece que la incertidumbre en la determinación de la masa de este equipo es de 0,0017 [Kg] en todo el intervalo; el comportamiento del error en la indicación se aprecia en el siguiente diagrama de calibración.

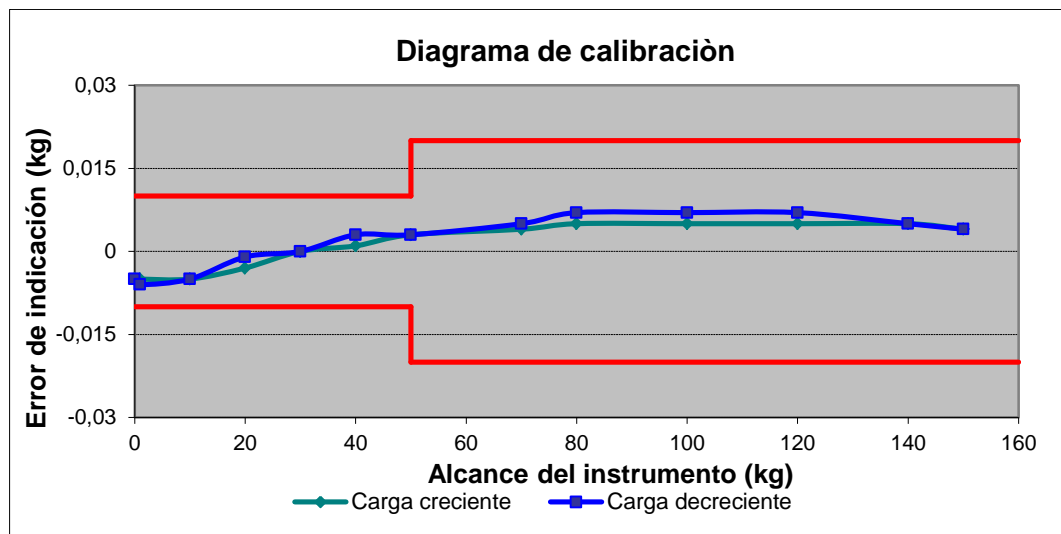
Figura 56. Diagrama de Calibración Balanza 60 Kg



Fuente. Corporación CDT de GAS

El certificado de calibración INFC–12–BAL–038–1862 de la balanza de 150 Kg, establece que la incertidumbre en la determinación de la masa de este equipo es de 0,0027 [Kg] en todo el intervalo; el comportamiento del error en la indicación se aprecia en el siguiente diagrama de calibración.

Figura 57. Diagrama de Calibración Balanza 150 Kg



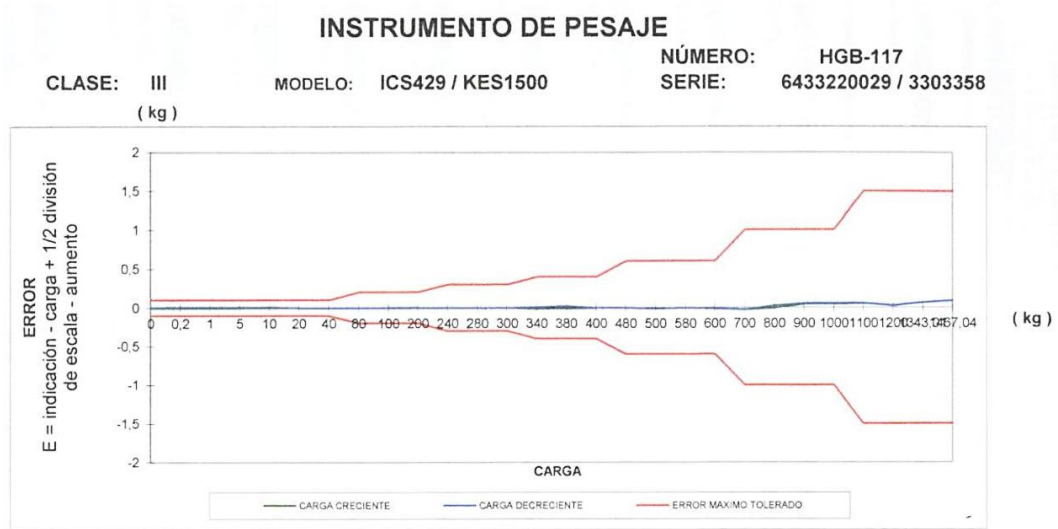
Fuente: Corporacion CDT de GAS.

En la calibración acreditada de la balanza de 1500 Kg se genero el certificado HGB-117, allí se reporta que la incertidumbre de la medición del instrumento de pesaje es de:

$$U \text{ Kg} = 0,0524581340 + 0,0000326767 \cdot m[\text{Kg}]$$

El comportamiento del error en la indicación de este instrumento se aprecia en la figura 58.

Figura 58. Diagrama de Calibración Balanza 1500 Kg



Fuente. Corporacion CDT de GAS.

## 5.2 Prueba de Fugas

Luego de realizar el montaje y la integración del banco de calibración, se realizó la prueba de fugas y hermeticidad del circuito hidráulico. Esta prueba consistió en realizar el montaje de las tuberías de medición de 3" sin ningún medidor bajo prueba como se observa en la figura 59.

Figura 59. Prueba Funcionamiento – Línea de Calibración 3"



Fuente: El Autor.

Se efectuó el bloqueo de las vías de bypass, conmutando sus válvulas a la posición de cierre, para luego generar presión aumentando la frecuencia de la bomba de 20 Hp hasta un máximo de 80 Psi durante un tiempo de 15 minutos.

Inicialmente se presentaron fugas de agua en las roscas de los acoples rápidos para las mangueras y en las bridas del sistema de regulación. Estas se solucionaron aportando mas torque de apriete.

### **5.3 Funcionamiento y Alcance del Sistema de Bombeo**

Inicialmente se verificó la conmutación de las válvulas automáticas desde la plataforma de control, realizando el accionamiento inicial de forma manual y el des-accionamiento por un temporizador.

Seguidamente se efectuaron las pruebas de variación del caudal con respecto a la variación de frecuencia para cada una de las bombas, estableciendo un tiempo de conmutación de 1 min para las válvulas automáticas del sistema SVD1, utilizando la balanza BLZ3 de 1500Kg y línea de calibración de 3", sin ningún medidor bajo prueba.

Para cada frecuencia se realizaron 5 repeticiones; los resultados se aprecian en la tabla 27 y el comportamiento lineal entre estas variables, se aprecia en las figuras 60 y 61.

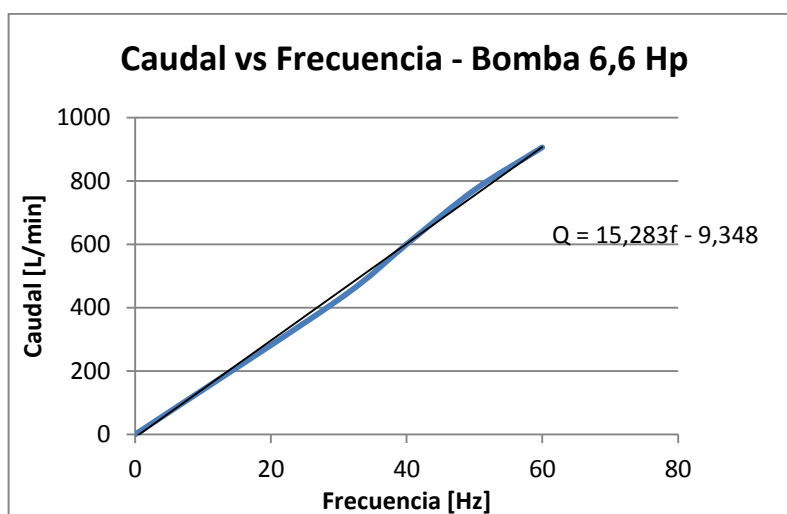
Con los resultados obtenidos y analizando el comportamiento del sistema de bombeo y las curvas de fricción (*Figura 30*), se determino el punto de calibración correspondiente a 1400 L/min, para un medidor que genere una caída de presión máxima de aproximadamente 8 psi a ese caudal de operación.

Tabla 27. Variación de Caudal Respecto a la Variación de Frecuencia

Frec.	Bomba 6,6 Hp			Bomba 20 Hp		
	Hz	No	Caudal LPM	Caudal Prom	No	Caudal LPM
0	1	0	0	1	0	0
30	1	425,78	425,83	1	657,6	658,8
	2	425,06		2	659,95	
	3	428,36		3	659,1	
	4	423,92		4	658,85	
	5	426,06		5	658,5	
40	1	600,7	600,32	1	908	905,86
	2	599,54		2	905,85	
	3	601,01		3	905,1	
	4	601,05		4	905,3	
	5	599,3		5	905,05	
50	1	770,7	771,75	1	1202,5	1201,9
	2	774,35		2	1200,95	
	3	771,85		3	1202,7	
	4	771,45		4	1201,85	
	5	770,4		5	1201,5	
60	1	906,1	906,18	1	1457,95	1458,5
	2	905,35		2	1458,05	
	3	908,3		3	1458,65	
	4	905,55		4	1459,15	
	5	905,6		5	1458,7	

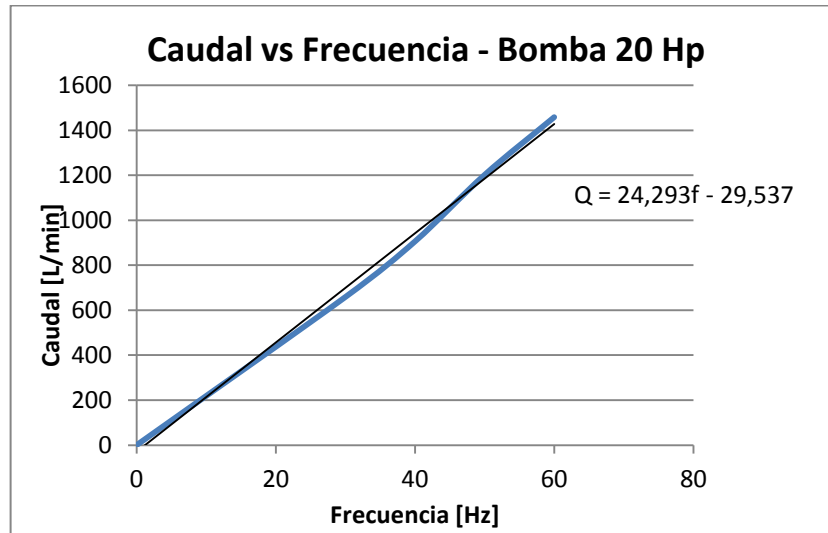
Fuente: El Autor.

Figura 60. Caudal vs Frecuencia - Bomba 6,6 Hp



Fuente: El Autor.

Figura 61. Caudal vs Frecuencia - Bomba 20 Hp



Fuente: El Autor.

#### 5.4 Calibración de un medidor másico

Con el sistema libre de fugas y funcionando adecuadamente la conmutación de las válvulas y la regulación del caudal, se realizó el montaje de las tuberías de medición de 1" para calibrar el medidor másico tipo coriolis CNG50 de marca Micro Motion, propiedad del CDT de GAS, como se observa en figura 62.

Figura 62. Calibración Medidor Másico CNG50



Fuente: El Autor.

Este medidor tiene un rango de flujo de 0 a 100 Kg/min, pero por su aplicación en GNV opera aproximadamente a 15Kg/min, razón por la cual se calibro en el rango de 2,03 Kg/min a 31,97 Kg/min, empleando la bomba de 6,6 [Hp], el SVD-2 y la balanza BLZ1 de 60 Kg. Los resultados obtenidos al realizar esta prueba, se registraron en el certificado de calibración INFC-12-MFM-105-1862 y se presentan a continuación.

Tabla 28. Condiciones Ambientales y de Operación de la Prueba

<b>Condiciones Ambientales</b>		
<b>Presión atmosférica [mbar]</b>	<b>Temperatura ambiente [°C]</b>	<b>Humedad relativa [%]</b>
905,8	20,4	52,0
<b>Condiciones de Operación</b>		
<b>Presión Máxima [psi]</b>	<b>Temperatura Prom. Agua [°C]</b>	<b>Fluido de Calibración</b>
11 ± 1 psi	21 ± 2	Agua

Fuente: Corporación CDT de GAS.

Tabla 29. Resultados de Calibración CNG50

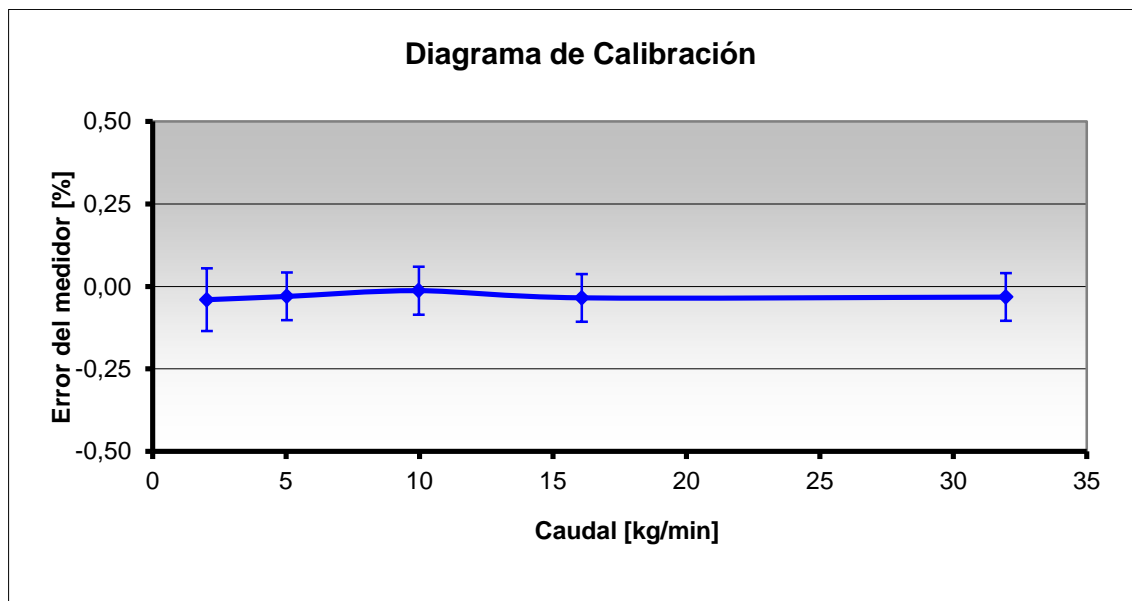
<b>Caudal Nominal [kg/min]</b>	<b>Masa de prueba [kg]</b>	<b>Error promedio [%]</b>	<b>Desviación estándar [%]</b>	<b>Factor de cobertura k</b>	<b>Incertidumbre [% Error]</b>
2,03	30,494	-0,04	0,01	1,99	0,10
5,03	40,245	-0,03	0,00	1,99	0,07
9,97	39,947	-0,01	0,00	1,99	0,07
16,08	40,334	-0,03	0,00	1,99	0,07
31,97	40,193	-0,03	0,002	1,99	0,07

Fuente: Corporación CDT de GAS.

El proceso de calibración fue exitoso por que se logro buena repetibilidad en cada punto de prueba y además los niveles de incertidumbre son inferiores a los proyectados para el banco. Igualmente se determinó que el medidor se encuentra dentro de la tolerancia de 0,25% reportada como desempeño metrológico en el

*datasheet* del medidor, ya que el error porcentual máximo mas la incertidumbre asociada, no sobrepasa dicho valor, como se aprecia en el diagrama de calibración (*Figura 63*); generando así, un nuevo *meter factor* corregido igual a 1,00028 para compensar el error en la indicación del medidor en operación.

Figura 63. Diagrama de Calibración CNG50



Fuente: Corporación CDT de GAS.

La evaluación completa del funcionamiento del banco no se realizara como parte de este proyecto, sino en una instancia posterior, debido a que el CDT de GAS no dispone en el momento de un medidor másico tipo coriolis con un alcance superior a 100 L/min. Tanto la adquisición de un medidor de alta capacidad, como el desarrollo de un proceso de inter-comparación con laboratorios internacionales acreditados, hacen parte de una siguiente etapa dentro de la estrategia de fortalecimiento de la infraestructura metrológica de la corporación.

## 6. CONCLUSIONES

- Se diseñó y se construyó un banco destinado a la calibración de medidores de caudal tipo coriolis por el método gravimétrico estático en las instalaciones de la corporación CDT de GAS con las siguientes especificaciones generales.

<b>Características Representativas</b>	
Fluido	Agua
Temperatura operación	$20 \pm 1$ [°C]
Alcance operativo	1 hasta 1400 [L/min]
Incertidumbre expandida	$\leq 0,1\%$
Presión de operación	$< 80$ [psi]
Capacidad de las balanzas	60, 150 y 1500 [kg]
Tamaño tuberías de medición	1/2 hasta 3 [in]

- Para el sistema de referencia del banco de calibración, se seleccionó y adquirió la balanza multi-intervalos KES 1500 de marca Mettler Toledo, con capacidad de 300Kg, 600 Kg y 1500 Kg y resolución de 10 g, 20g y 50g respectivamente para cada intervalo. Se garantizó el funcionamiento como patrón de trabajo, realizando la calibración acreditada de este equipo, con una incertidumbre máxima de 0,04213% relativa a su medición.
- Se diseñó y construyó un sistema de conducción de flujo con tuberías de medición intercambiables, en tamaños de ½", 1", 2" y 3" que permiten el montaje de distintos medidores másicos y garantizan un adecuado desarrollo del flujo.

- Para la generación del flujo, se seleccionaron y adquirieron las bombas centrífugas GSM-2B-20 de 20 Hp y AE 3 66-3 de 6,6 Hp de marca Barnes. Adicionalmente con el uso de los variadores de frecuencia y las válvulas reguladoras de caudal seleccionados, se cubre completamente los distintos escenarios de calibración especificados.
- Para determinar las condiciones de operación del banco, se seleccionaron y adquirieron instrumentos de presión manométrica en un rango de 0 a 100 psi de marca Dwyer con una clase de precisión de 0,25% a full escala, un transmisor de presión absoluta Dwyer con una clase de 0,5% full escala y sensores de temperatura Pyromation tipo RTD con un error máximo de 0,14° C en el intervalo de 15 a 25 °C.
- Realizada la integración de todos los sistemas mecánicos, estructurales, eléctricos y de instrumentación, se realizaron pruebas de funcionamiento en todo el alcance previsto para el banco. Además se efectuó una calibración satisfactoria de un medidor másico tipo coriolis GNC 50 en el intervalo de 2,03 Kg/min a 31,97 Kg/min con una incertidumbre máxima de 0,1% relativa al error.

## 7. RECOMENDACIONES

Realizar el desarrollo del diverter para garantizar un óptimo funcionamiento del banco de calibración y evitar posibles problemas de sobrepresión y variaciones en el caudal, además de garantizar una reducción en la incertidumbre por presentar menos error en el tiempo de llenado.

Aislar el cuarto del sistema de bombeo de la radiación solar y a su vez garantizar la refrigeración adecuada de las bombas, para evitar grandes variaciones en la temperatura del fluido de calibración.

Establecer periodos de encendido de las bombas centrifugas en bypass, para evitar problemas de corrosión en el interior de las mismas y de un programa de mantenimiento, dependiendo de los periodos de uso.

Tapar parcialmente los tanques de pesaje para evitar salpicaduras de agua fuera de este en los altos caudales, lo que se traduce en masa no pesada y un mayor error en el proceso de calibración. O tratar de cuantificar esta masa perdida e introducirla como fuente de incertidumbre.

Instalar baffles en el tanque de almacenamiento con la finalidad de reducir los movimientos de agua dentro del mismo y evitar la formación de vórtices y remolinos en la succión de las bombas, que permitan el ingreso de aire al sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters. API MPMS 5–6. Washington, D.C.: 2002. 54 p.

CRANE, División de Ingeniería. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw Hill, 1987. p 1.1-1.8, 2.1-2.14, A46-A49.

GREENE. Richard W. Válvulas: Selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill. 1992, p 28-53, 154-176, 189-193.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method. ISO 4185. Geneva, Suiza: ISO, 1980/Cor. 1:1993. 26 p.

KENNETH J. Bombas: Selección, uso y mantenimiento. McGraw Hill. 1992, p 26-29, 43-47, 71-95.

MICRO MOTION INC. Proving Coriolis Flow meters. Washington, D.C.: 1998. p. 37-42, 131-136, 207-222.

MILLER. Richard W. Flow Measurement Engineering Handbook. 3rd ed. McGraw Hill .Washington, D.C.: p. 1.4-1.5, 3.44-3.46, 6.32-6.38, 14.52-14.60.

TAPIAS, Erik. Diseño de un banco patrón para la calibración de medidores de flujo de líquidos por el método gravimétrico estático. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas, 2004. 198 p.

## ANEXOS

### ANEXO A. INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR MÁSIKO TIPO CORIOLIS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO

En este anexo se describe el modelo matemático y el procedimiento empleado para la determinación del error relativo de medición y la incertidumbre asociada a este, los cuales son empleados en la calibración de medidores másicos utilizando el principio de calibración por método gravimétrico estático.

#### Porcentaje de Error en la Indicación del Medidor Másico

##### Modelo Matemático

$$Error \% = \frac{M_{mut}}{M_i * FC_{vdf} * \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}}} - 1 * 100$$

Dónde:

*Error* = Porcentaje de Error en la indicación del medidor [%]

*M<sub>mut</sub>* = Masa Registrada por el Medidor Bajo Prueba [Kg]

*M<sub>i</sub>* = Masa Registrada por la Balanza [Kg]

*FC<sub>vdf</sub>* = factor de Corrección Valvula Desviadora de Flujo [Adimensional]

*ρ<sub>a</sub>* = Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>]

*ρ<sub>p</sub>* = Densidad de las Pesas Utilizadas en la Calibración de las Balanzas [Kg/m<sup>3</sup>]

*ρ<sub>w</sub>* = Densidad del Agua Utilizada como Fluido de Calibración [Kg/m<sup>3</sup>]

## Incertidumbre Asociada a la Determinación del Porcentaje de Error del Medidor en Calibración

A continuación se describe el procedimiento para la estimación de la incertidumbre<sup>2</sup> asociada al porcentaje de error en la indicación del medidor empleando el método de pesaje gravimétrico estático para ejecutar la calibración. Los valores son obtenidos para cada uno de los puntos de calibración.

### Fuentes de Incertidumbre.

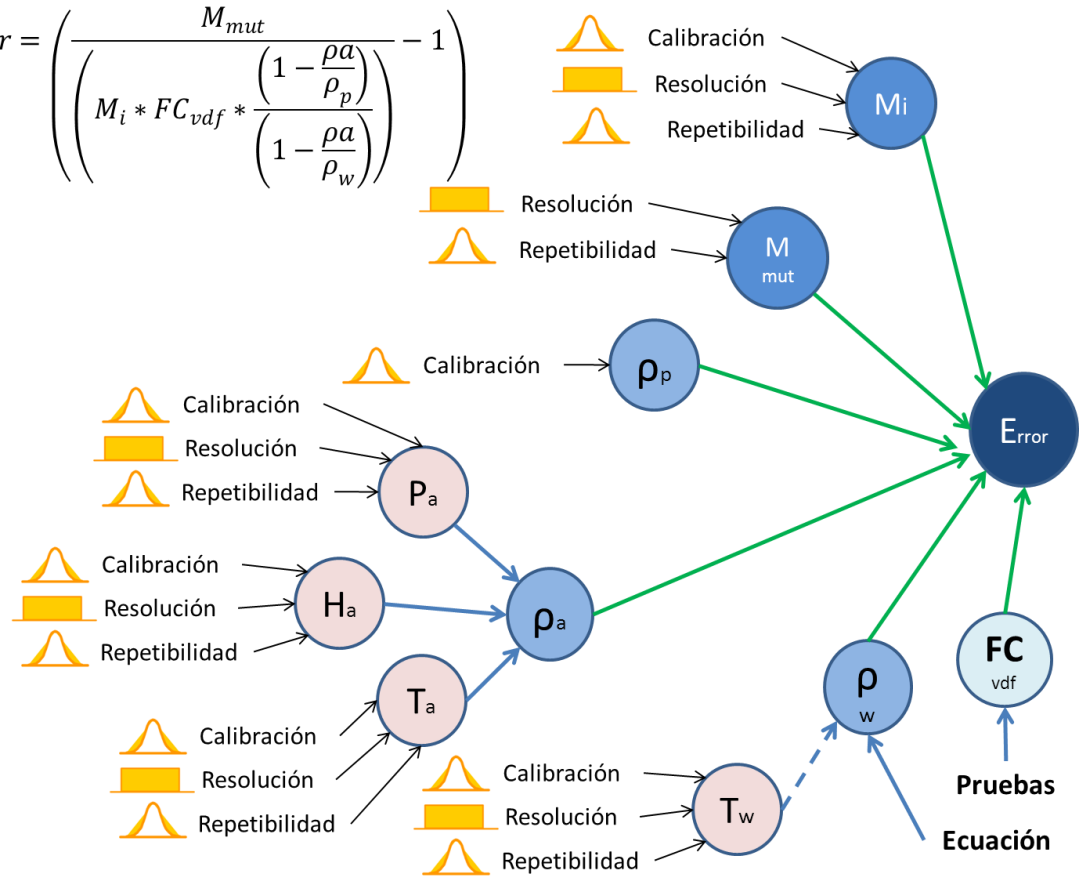
De acuerdo con el modelo matemático expresado anteriormente, las fuentes de incertidumbre a considerar para cada una de las variables que contribuyen a la incertidumbre de medición del porcentaje de error de los sistemas de medición bajo prueba son las siguientes:

Descripción	Fuente de Incertidumbre	Símbolo	Tipo	Distribución	Formula
<b>Masa Registrada por el Medidor Bajo Prueba</b> $U_{Mmut}$	Repetibilidad de las Lecturas	$U_{RMmut}$	A	Normal	$\frac{S_{Mmut}}{n}$
<b>Masa registrada por la Balanza</b> $U_{Mi}$	Calibración de la Balanza	$U_{CALMi}$	B	Normal	$\frac{U_{Mi}}{k}$
	Deriva de la Balanza	$U_{DERMi}$	B	Rectangular	$\frac{D_{Mi}}{12}$
	Resolución de la Balanza	$U_{RESMi}$	B	Rectangular	$\frac{R_{Mi}}{12}$
	Oscilación	$U_{OSCMi}$	B	Rectangular	$\frac{O_{Mi}}{12}$
<b>Factor de Corrección Válvula Desviadora de Flujo</b> $U_{FCVdf}$	Error por Tiempo de Activación de las Válvulas (Pruebas R&R)	$U_{TAFcvdf}$	B	Rectangular	$\frac{TA_{FCVdf}}{12}$
<b>Densidad del Aire</b> $U_{\rho a}$	Temperatura Ambiente, Presión Atmosférica y Humedad Relativa	$U_{\rho a}$	La densidad del aire y su incertidumbre se calculan según el manual de instructivo I-039 "determinación de la densidad del aire y evaluación de la incertidumbre asociada" del CDT de GAS		

<sup>2</sup> ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)"

<b>Densidad de las Pesas</b> $U_{\rho p}$	Certificado de Calibración	$U_{\rho p}$	El valor convencional de la densidad de las pesas a 20 °C es de 8000 kg/m3. La incertidumbre de la densidad de las pesas se obtiene del fabricante de las pesas o se encuentra en el certificado de calibración de las mismas.		
<b>Densidad del Agua</b> $U_{\rho w}$	Ecuación de TANAKA	$U_{\rho w}$	Las fuentes de incertidumbre relacionadas con la densidad del agua dependen de la temperatura del medidor bajo prueba.		
<b>Temperatura Medidor Bajo Prueba</b> $U_{T_{Mut}}$	Clase Confirmada Mediante la Calibración del Sensor	$U_{CAL_{T_{mut}}}$	B	Normal	$\frac{U_{T_{mut}}}{k}$
	Deriva del Sensor de Temperatura	$U_{DER_{T_{mut}}}$	B	Rectangular	$\frac{D_{T_{mut}}}{\sqrt{12}}$
	Resolución del Sensor de Temperatura	$U_{RES_{T_{mut}}}$	B	Rectangular	$\frac{R_{T_{mut}}}{\sqrt{12}}$

$$Error = \left( \frac{M_{mut}}{\left( M_i * FC_{vdf} * \frac{\left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right)} \right)} - 1 \right)$$



✚ *Coeficientes de Sensibilidad ( $C_i$ )*

Con base en el modelo matemático expresado en la Ecuación, se determinaron los coeficientes de sensibilidad para cada una de las fuentes de incertidumbre establecidas, los coeficientes son empleados para determinar la incertidumbre combinada del error.

Con el fin de facilitar la expresión de los coeficientes de sensibilidad se define una función auxiliar denominada factor:

$$Factor = \frac{100 * M_{mut}}{FC_{vdf} * M_i * \frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}$$

1. Coeficiente de sensibilidad de la masa registrada por el medidor bajo prueba:  $C_{M_{mut}}$

$$\frac{\partial E}{\partial M_{mut}} = Factor * \frac{\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}{M_{mut}}$$

2. Coeficiente de sensibilidad de la masas colectada en el tanque:  $C_{M_i}$

$$\frac{\partial E}{\partial M_i} = Factor * \frac{\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}{M_i}$$

3. Coeficiente de sensibilidad del factor de corrección de la masa debido a la válvula desviadora:  $C_{FC_{vdf}}$

$$\frac{\partial E}{\partial FC_{vdf}} = Factor * \frac{\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}{FC_{vdf}}$$

4. Coeficiente de sensibilidad de la densidad del aire:  $C_{\rho_a}$

$$\frac{\partial E}{\partial \rho_a} = Factor * \frac{1}{\rho_w} - \frac{\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}{\rho_p * \frac{\rho_a}{\rho_p} - 1}$$

5. Coeficiente de sensibilidad de la densidad de las pesas:  $C_{\rho_p}$

$$\frac{\partial E}{\partial \rho_p} = Factor * \frac{\rho_a * \frac{\rho_a}{\rho_w} - 1}{\rho_p^2 * \frac{\rho_a}{\rho_p} - 1}$$

6. Coeficiente de sensibilidad de la densidad del agua  $C_{\rho_w}$

$$\frac{\partial E}{\partial \rho_w} = Factor * \frac{\rho_a}{\rho_w^2}$$

✚ *Incertidumbre Combinada*

$$U_c = \sqrt{c_i \cdot u_i^2}$$

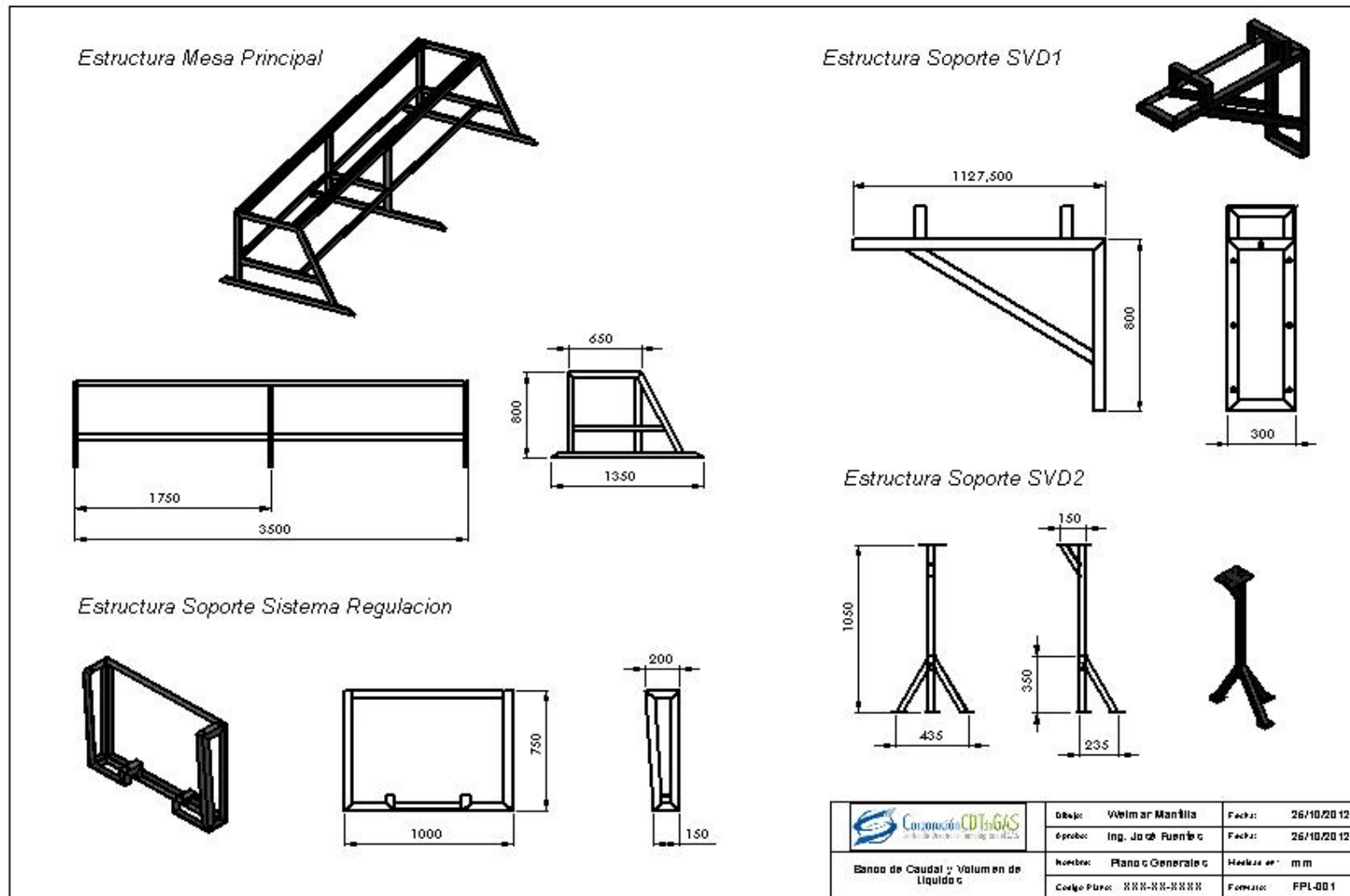
✚ *Incertidumbre Expandida*

La incertidumbre expandida es expresada con un factor de cobertura  $k$  para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

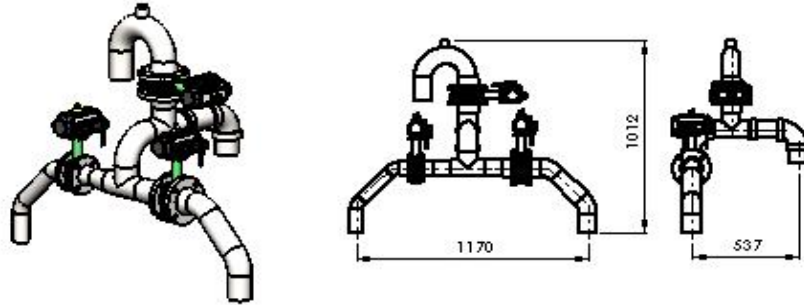
$$U = U_c \cdot k$$

Fuente: Corporación CDT de GAS.

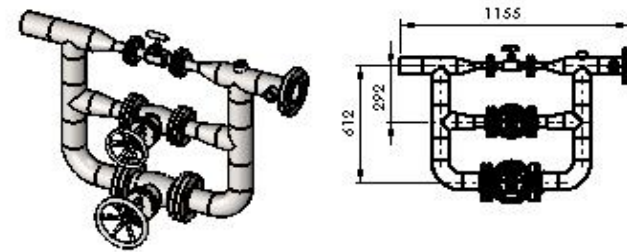
## ANEXO B. PLANOS GENERALES



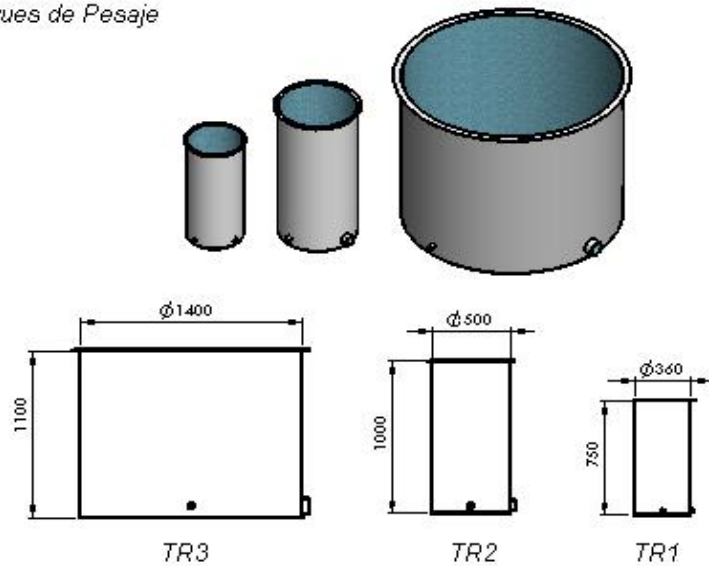
Sistema de Valvulas Desviadoras 1



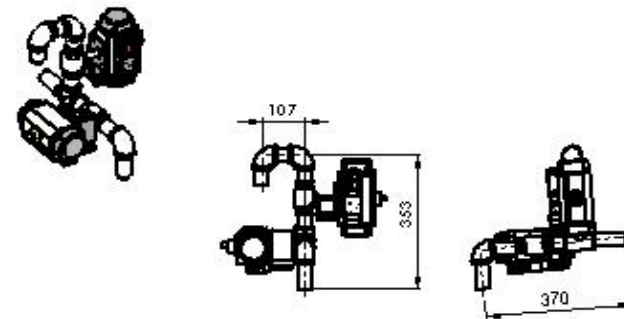
Sistema de Regulacion



Tanques de Pesaje



Sistema de Valvulas Desviadoras 2



 LABORATORIO DE CAUDAL Y VOLUMEN DE LIQUIDOS	Diseñó: Wilmar Mantilla Esbozó: Ing. José Fuentes	Fecha: 28/10/2012 Fecha: 28/10/2012
	Nombre: Plano General Código Plano: XXX-XX-XXXX	Medida en: mm Formato: FPL-001